

ESCUELA UNIVERSITARIA DE
ARQUITECTURA TÉCNICA DE A CORUÑA

Departamento de Construcciones Arquitectónicas

PROYECTO FIN DE CARRERA

CONSTRUCCIÓN CON BALAS DE PAJA.
Estudio de las propiedades de la paja embalada y
su utilización como material de construcción

Alumno

Francisco Javier Carro Castro

Tutor

Valentín Souto García

A Coruña, Marzo de 2007

Le quiero dedicar este proyecto a mi familia y a todas las personas que me han apoyado para su realización, en especial a Valentín Souto, Teresa Gómez y José Antonio Pose.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a todas las personas que han aportado su granito de arena para que este proyecto pudiera alcanzar su final.

Gracias a: Valentín Souto, Teresa Gómez y José Antonio Pose, Cristina Carro, José Manuel Carro, Alberto Balo, Francisco Ferreiro, Antonio Jorge, Iván Blanco, Marta Alberte, Carlos Carneiro, Eduardo Suárez, Amanda Suárez, Vanessa Suárez, Diego Marcos Ramas, Estefanía Gómez, Antonio Sabucedo, José Antonio Hernando, César Lema, John Straube, Bruce King, Rikki Nitzkin, Iñaki Urkía, Rafael Serra, Carlos Salazar, María Molina, Patricia Cebada, Bárbara Jones, Catherine Wanek, John Glassford, John Zhang, Rudolf Bintinger y Kelly Lerner.

ÍNDICE

Capítulo 1 - Introducción

1.1 Objeto y alcance del estudio	8
1.2 Introducción a la paja.....	10
1.2.1 Definición.....	10
1.2.2 Cultivo.....	11
1.2.3 Embalado.....	12
1.2.4 Características	13
1.2.5 Proceso de descomposición de la paja	14
1.3 Producción y usos actuales de la paja	15
1.4 Alternativas a la quema de la paja en EEUU.....	16
1.4.1 Introducción	16
1.4.2 Ley de reducción de la quema de la paja de arroz de California de 1991	17
1.4.3 Alternativas a la quema de la paja de arroz.....	17
1.4.3.1 Energías alternativas.....	18
1.4.3.2 Fabricación y construcción.....	19
1.4.3.3 Protección ambiental	20
1.4.3.4 Alimento para el ganado.....	21
1.4.3.5 Prácticas comunes	21
1.5 El sistema constructivo	21

Capítulo 2 - Antecedentes históricos y situación actual

2.1 Historia de la construcción con paja.....	24
2.2 Situación actual en la escena internacional	29

Capítulo 3 - La corriente de la construcción ecológica

3.1 Consumo energético actual.....	31
3.2 La construcción ecológica	31
3.3 El imperativo ambiental	32
3.4 Principios de diseño.....	33
3.5 Valoraciones ambientales.....	34

Capítulo 4 - La arquitectura bioclimática construida con balas de paja

4.1 Introducción.....	36
4.2 Conceptos de arquitectura bioclimática	36
4.2.1 Introducción	36
4.2.2 Aspectos acústicos.....	37
4.2.3 Aspectos lumínicos	37
4.2.4 Aspectos térmicos	38
4.2.5 Aspectos eólicos y pluviométricos	38
4.2.6 Orientación solar	39
4.2.7 Altura del sol y acimut	39
4.2.8 Fundamentos de la energía solar pasiva.....	42
4.2.9 Zonificación térmica y espacios tampón.....	44
4.2.10 Termocirculación	44
4.2.11 Las galerías.....	45
4.2.12 Muros trombe	45
4.3 Aplicación a la construcción con balas de paja.....	46

Capítulo 5 - Proyectos destinados al desarrollo de zonas necesitadas

5.1 Introducción.....	49
5.2 El Proyecto Navajo.....	49
5.3 Grupo de desarrollo “Red Feather”	50
5.4 Desarrollo de las zonas rurales de China.....	52
5.4.1 Situación actual	52
5.4.2 Técnicas alternativas	53

Capítulo 6 - Ventajas e inconvenientes de la construcción con balas de paja

6.1 Ventajas de la construcción con balas de paja	56
6.1.1 Introducción	56
6.1.2 Belleza y comodidad	56
6.1.3 Facilidad de construcción.....	56
6.1.4 Beneficios medioambientales.....	56
6.1.5 Sostenibilidad	57
6.1.6 Economía.....	57
6.2 Inconvenientes	57
6.2.1 Presencia de roedores.....	57
6.2.2 Presencia de insectos	57
6.2.3 Durabilidad.....	58
6.2.4 Pudrición	58
6.2.5 Incendios	58
6.2.6 Fijaciones a las paredes	58

Capítulo 7 - Análisis estructural

7.1 Consideraciones generales sobre la construcción con balas de paja	60
7.2 Características portantes de una bala de paja bajo compresión	62
7.2.1 Introducción	62
7.2.2 Análisis técnico	62
7.2.2.1 Introducción al análisis estructural.....	62
7.2.2.2 Descripción del procedimiento de análisis	63
7.2.2.3 Ensayo en balas de paja sin recubrimiento	64
7.2.2.4 Ensayos en balas de paja con recubrimiento	68
7.2.2.5 Ensayo comparativo	74
7.3 Características portantes del recubrimiento.....	80
7.3.1 Introducción	80
7.3.2 Composición de las mezclas a base de barro.	80
7.3.3 Erosión	81
7.3.4 Resistencia a compresión	82
7.4 Asiento de las balas apiladas	83
7.4.1 Introducción	83
7.4.2 Descripción del ensayo.....	83
7.4.3 Resultados y conclusiones.....	84
7.4.4 Gráfica de asiento de las paredes de balas de paja	87
7.5 Características portantes de una pared de balas de paja.....	88
7.5.1 Comportamiento del muro y formas de fallo	88
7.5.2 Análisis técnico	89
7.5.2.1 Descripción del ensayo para una pared de dos plantas de altura	89
7.5.2.2 Resultados del ensayo.....	91
7.5.2.3 Descripción del ensayo para paredes con distintos tipos de recubrimiento.....	95
7.5.2.4 Resultados del ensayo.....	97
7.5.3 Limitaciones de carga y altura para las paredes	98

7.5.4 Resumen de los ensayos estructurales realizados.....	100
7.5.5 Comentarios sobre los ensayos	102
7.6 Resistencia al viento	103
7.6.1 Introducción	103
7.6.2 Propiedades físicas	103
7.6.3 Descripción de los ensayos	104
7.6.4 Comportamiento de la pared antes del agrietamiento	105
7.6.5 Comportamiento de la pared después del agrietamiento	106
7.6.6 Comentarios del ensayo	108
7.6.7 Limitaciones de altura de las paredes.....	108
7.7 Resistencia a los tornados.....	111
7.7.1 Descripción del ensayo.....	111
7.7.2 Reportaje fotográfico de las fases del ensayo	112
7.8 Resistencia sísmica	117
7.8.1 Comportamiento general	117
7.8.2 Introducción al ensayo	117
7.8.3 Descripción del ensayo.....	118
7.8.4 Procedimiento de ensayo.....	120
7.8.5 Recomendaciones de diseño y conclusiones	122

Capítulo 8 - Comportamiento térmico

8.1 Introducción.....	124
8.2 Análisis técnico	124
8.3 Conclusiones sobre el comportamiento térmico	129

Capítulo 9 - Comportamiento higrotérmico

9.1 Introducción.....	131
9.2 La paja como acumulador de humedad.....	131
9.3 Comportamiento higrotérmico de las paredes	133
9.3.1 Problemas de humedad.....	133
9.3.2 El equilibrio higrométrico	133
9.3.3 Los orígenes de la humedad	134
9.3.4 Evacuación de la humedad y secado	135
9.3.5 Acumulación de humedad	135
9.3.6 Técnicas de control de humedad	136
9.3.6.1 Control de la lluvia	136
9.3.6.2 Control de la difusión y barreras de vapor.....	138
9.3.7 Condensaciones intersticiales.....	139
9.3.8 Locales húmedos	142
9.3.9 Ensayo de humedad y temperatura en muestras de paja	143
9.3.9.1 Introducción.....	143
9.3.9.2 Descripción del ensayo.....	143
9.3.9.3 Conclusiones sobre el comportamiento de la paja húmeda	145
9.4 Comportamiento higrotérmico de los recubrimientos	146
9.4.1 Introducción	146
9.4.2 Análisis técnico	146
9.4.2.1 Propiedades de los materiales.....	146
9.4.2.2 Procedimiento de ensayo.....	147
9.4.2.3 Permeabilidad al vapor de agua.....	148
9.4.2.4 Resultados.....	149
9.5 Desarrollo de sensores higrométricos	152
9.6 Estudios de humedad en muros.....	153

9.7 Monitorización del comportamiento higrotérmico de paredes de balas de paja.....	157
9.7.1 Descripción del estudio	157
9.7.2 Resultados	159
9.7.3 Conclusiones	164

Capítulo 10 - Comportamiento acústico

10.1 Introducción	166
10.2 Análisis técnico	166
10.3 Conclusiones del análisis técnico	169

Capítulo 11 - Resistencia al fuego

11.1 Introducción	172
11.2 Análisis técnico	172
11.3 Conclusiones del análisis técnico	182

Capítulo 12 - Proceso constructivo

12.1 Inicio del proceso constructivo	185
12.1.1 Introducción	185
12.1.2 Elección del emplazamiento.....	185
12.1.3 Elección de las balas de paja	185
12.1.4 Manipulación de las balas de paja.....	188
12.1.5 Modificación de las balas de paja.....	188
12.2 Cimentaciones	190
12.2.1 Introducción	190
12.2.2 Tipos de cimentaciones	190
12.2.2.1 Murete de piedra con suelo de entramado de madera.....	191
12.2.2.2 Cimentación de bloques sobre grava	192
12.2.2.3 Hormigón vertido	194
12.2.2.4 Cimentación de zanja de escombros.....	195
12.2.2.5 Cimientos de neumáticos de automóvil rellenos con piedras	196
12.2.2.6 Losa de cimentación superficial aislada térmicamente	197
12.2.3 Dimensionado de cimentación	199
12.2.4 Características de los cimientos	200
12.2.5 Muros de contención con fardos de paja	200
12.3 Técnicas constructivas	201
12.3.1 Introducción a las técnicas constructivas	201
12.3.2 Autoportante o “estilo Nebraska”.....	201
12.3.3 Autoportante con estructura ligera	205
12.3.4 Autoportante con relleno de mortero.....	206
12.3.5 De paja como relleno o con estructura auxiliar.....	207
12.3.6 Otras técnicas	208
12.4 Ejecución de las paredes.....	209
12.4.1 Proceso de ejecución	209
12.4.2 Ataduras coronación-cimentación.....	211
12.4.3 Fijación de las balas	214
12.4.4 Asientos y compresión	215
12.4.5 Electricidad y conducciones de agua.....	215
12.4.6 Entramados horizontales	216
12.5 Apertura de huecos. Puertas y ventanas	217
12.6 Recubrimientos de las paredes	220
12.6.1 Pasos previos a la aplicación del recubrimiento.....	220

12.6.2 Morteros para el recubrimiento	224
12.6.2.1 Introducción.....	224
12.6.2.2 Morteros de cal	224
12.6.2.3 Mortero de arcilla	241
12.6.2.4 Morteros de cemento	243
12.6.3 Trasdosado al interior con placas de cartón yeso	243
12.6.4 Protección de la fachada frente al agua de lluvia	244
12.6.4.1 Introducción.....	244
12.6.4.2 Lámina impermeable al agua y permeable al vapor de agua.....	244
12.6.4.3 Bloque preformado con mortero y lámina incorporados	246
12.6.4.4 Los estucos	247
12.6.4.5 Otros tipos de acabados	248
12.6.5 Fachadas trasventiladas	248
12.7 Cubiertas.....	252
12.7.1 Enramado estructural	252
12.7.2 Tipologías de cubierta	252
12.7.2.1 Introducción.....	252
12.7.2.2 Cubiertas a cuatro aguas	253
12.7.2.3 Cubiertas piramidales	253
12.7.2.4 Cubiertas a dos aguas	253
12.7.2.5 Cubiertas a un agua.....	254
12.7.2.6 Cubiertas clerestorio	254
12.7.2.7 Cubiertas planas.....	255
12.8 Porches	257
12.9 Suelos	258
12.9.1 Introducción	258
12.9.2 Forjado sanitario.....	258
12.9.3 Soleras	260
12.9.4 Suelos de barro y paja	262
12.9.5 Varios	264

Capítulo 13 - Aspectos normativos

13.1 Introducción	266
13.2 Normativa sobre construcción con balas de paja a nivel mundial.....	267
13.3 Normativa en Estados Unidos.....	270
13.3.1 Introducción	270
13.3.2 Normativa de construcción estadounidense	270
13.3.3 Compañías aseguradoras	274
13.4 La situación en España.....	274
13.4.1 Proceso administrativo para construir una vivienda.....	274
13.4.2 Exigencias del Código Técnico de la Edificación.....	276

Capítulo 14 - Análisis económico

14.1 Ahorro en ejecución material	280
14.1.1 Introducción	280
14.1.2 Coste de la casa piloto del Navajo Project	281
14.1.3 Coste de una vivienda unifamiliar en Navarra	282
14.1.4 Comparación de costes con los de un cerramiento convencional	284
14.1.5 Comparación de costes con un cerramiento de iguales prestaciones	290
14.1.6 Comparación de costes de la hoja interior de una fachada trasventilada	292
14.1.7 Resumen de la comparación de costes de ejecución de cerramientos.....	293
14.1.8 Conclusiones de la comparación de costes.....	294

14.2 Ahorro energético en calefacción	295
14.2.1 El consumo de energía en viviendas de balas de paja	295
14.2.1.1 Introducción.....	295
14.2.1.2 Programa de investigación.....	295
14.2.1.3 Conclusiones sobre el consumo energético	296
14.2.2 Comparación de costes con los de un cerramiento convencional	296
14.2.2.1 Introducción.....	296
14.2.2.2 Obtención de los valores de exigencia calorífica mediante software	297
14.2.2.3 Conclusiones de la comparativa entre cerramientos.....	302
14.3 Conclusiones del análisis económico.....	302
 Capítulo 15 - Recapitulación y conclusiones generales	
15.1 Recapitulación.....	305
15.2 Conclusiones generales	308
 Apéndice 1 – Correspondencia mantenida	311
Apéndice 2 – Consultores del estudio	333
Apéndice 3 – Proceso de ejecución de una pared en Vedra	336
Apéndice 4 – Ejemplos de construcciones existentes	342
Apéndice 5 – Páginas web consultadas	362
Apéndice 6 – Bibliografía utilizada	364
Apéndice 7 – Planos del proyecto de una vivienda de balas de paja en Navarra	370
Apéndice 8 – Certificados de ensayos realizados.....	378

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto y alcance del estudio

¿Es posible construir con balas de paja? Esta es la pregunta que se puede plantear cualquier persona antes de leer este trabajo o cualquier publicación existente.

La primera vez que oí hablar de esta posibilidad fue en casa de unos amigos, Teresa y José Antonio, y pensé que me estaban tomando el pelo. Comprobé que no era así cuando me enseñaron un cerramiento de una estancia y pude ver las balas de paja unas encima de otras formando un muro. Llegado a este punto, la posibilidad de que fuese una broma ya la había descartado, pero me surgieron muchas dudas acerca de lo segura o duradera que pudiera ser una construcción de este tipo. Sabía que existía bibliografía sobre el tema, aunque nunca la había manejado, pero cuando me puse a buscarla me sorprendí de lo documentado que está el tema (hay que decir que la mayor parte en inglés).

Me tocaba ahora empezar a asimilar esta información para poder analizarla y forjarme una opinión, y así fue como empecé a leer manuales, publicaciones y demás textos que encontraba. De esta forma, me fui dando cuenta de que la opinión que inicialmente tenía sobre este tema era fruto de mi ignorancia sobre el mismo. La realidad es que las posibilidades de las balas de paja para ser utilizadas en la construcción son muchas y reales. Por esta razón entenderé que la persona que coja este documento en sus manos lo haga con una sonrisa en su cara pensando en la casa del cuento de los tres cerditos; sin embargo, espero que una vez terminada su lectura se haya comprendido que se trata de una forma más de construir con sus ventajas e inconvenientes pero, sobre todo, con muchas particularidades.

Tenía la oportunidad de realizar mi trabajo fin de carrera sobre la construcción con muros de paja y sabía que iba a tener dificultades, sobre todo por ser un tema muy poco conocido y poco estudiado. Con el tiempo comprobé que esto no era tanto así y también me di cuenta de que con este estudio muchas personas que nunca habían oído hablar de este tema podrían tener acceso a una información que ellos juzgarían de interesante o no, pero que ampliaría, en cierto modo, sus conocimientos sobre la construcción.

Este estudio nace con la finalidad de dar a conocer un concepto y unas técnicas de construcción poco comunes que aún están en investigación porque escasamente superan los 100 años de historia. Se podría decir que se encuentra en pañales comparado con la construcción con piedra, que tiene miles de años de historia y de la que ya se sabe prácticamente todo, si no todo. Se centrará fundamentalmente en la parte material de la construcción y, aunque se hará mención a normativa extranjera y comprobaciones con normativa nacional, no pretende ser el documento que autorice el empleo del material para ciertos usos como puede ser el estructural. Esto sería de una complejidad superior a la de este trabajo fin de carrera.

Se sabe que hay construcciones con balas de paja muy antiguas y en varias partes del mundo, pero no en las suficientes como para comprobar su comportamiento con diferentes climatologías. Éste es un aspecto de los más importantes: proteger las balas de las inclemencias del tiempo para conseguir una construcción duradera y estable. Esto, sobre todo, necesita experimentación, tanto para adquirir las habilidades y técnicas necesarias para la construcción como para analizar las construcciones existentes y aprender de posibles errores cometidos. Como se verá a lo largo de los capítulos, este tipo de construcción empezó en los Estados Unidos y allí tienen ya muy experimentada esta construcción. Hay otros países que también han tenido una actividad constructiva importante paralela a un trabajo de investigación como pueden ser Australia o





CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

Inglaterra, pero la realidad es que en España hay muy pocas construcciones de este tipo, de las cuales sólo un porcentaje muy reducido están realizadas por profesionales.

Conceptos como *bioconstrucción*, *bioarquitectura* o *arquitectura ecológica* pueden ser aptos para definir lo que aquí estamos tratando. La paja es un material natural, ecológico y un recurso renovable de nuestro planeta. En cierto modo, ésta es una de las razones por las que este tipo de construcción está teniendo tanto auge en algunas zonas. En nuestro país muchas personas se han animado a realizar construcciones con balas de paja por ser un recurso renovable y respetuoso con el medioambiente y la inmensa mayoría son autoconstructores. De esta forma, tienen además la satisfacción de realizar ellos mismos su vivienda que, en muchos casos es sencilla, pequeña y sin tantas comodidades o lujos como puede tener una vivienda convencional. Por supuesto que este trabajo es respetable e incluso admirable, pero es necesario saber que la utilización de la paja para la construcción de una casa no significa tener que prescindir de comodidades, calidades o incluso de diseños actuales; todo depende del trabajo y esfuerzo que se quiera dedicar y de la creatividad y conocimientos de las personas que participen en el proceso.

Todos sabemos que el mundo en el que vivimos no es perfecto, pero me planteo la posibilidad (más bien la utopía) de que fuésemos capaces de crear un mundo en el que nada de lo que el hombre construyese fuera contaminante o dañino para el medioambiente. Nuestro mundo seguiría siendo imperfecto, pero bastante menos y, aunque alcanzar esto parece imposible, todo lo que hagamos en beneficio del planeta será también en beneficio nuestro.



CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.2 Introducción a la paja

1.2.1 Definición

La paja es el tallo de ciertas plantas que sirve de estructura entre las raíces y el grano. Existen muchas plantas que tengan tallo al que se le pueda llamar paja, pero las que se pueden embalar para formar un bloque son el trigo, el centeno, la cebada, el arroz, el lino y la avena. En el caso del trigo o del centeno, se debe comenzar su proceso de secado cuando todavía está en pie, antes de ser segada. Después de que la planta es cortada y secada, su estructura permanece intacta, a no ser que ésta se descomponga por mecanismos biológicos o químicos. A diferencia de cómo ocurre con el heno, el grano se le saca y, por lo tanto, es menos atractivo a las plagas y menos vulnerable a la actividad biológica. La composición de la paja es químicamente parecida a la de la madera: está compuesta por celulosa, hemicelulosa, lignina y sílice. El sílice se encuentra en cantidades superiores al 20% en la paja de arroz, lo que hace que sea especialmente resistente a las plagas. Esta propiedad también implica que este tipo de paja es más dura y más resistente mecánicamente, aunque a la hora de soportar cargas, lo que realmente importa es el comportamiento del fardo en general y no el individual de la paja. Donde sí se va a notar la resistencia mecánica es a la hora de cortar los fardos para modificar su tamaño, ya que será un proceso mucho más costoso.



Fig. 1.1- Planta de trigo en época de maduración

La paja es un material natural, un recurso renovable, que puede durar cientos de años bajo determinadas condiciones. Ha sido encontrada en tumbas Egipcias y en capas de glaciares¹, sin embargo, bajo condiciones ambientales normales, la paja se descompone como lo hace cualquier fibra natural como la madera, el papel o el algodón. La rapidez con la que la descomposición ocurra depende de las condiciones en las que se encuentre, principalmente humedad y temperatura.

Los distintos tipos de paja han sido siempre una parte importante de la agricultura. Antes de la aparición de los fertilizantes inorgánicos y de la mecanización, estos elementos eran una parte fundamental de la producción agrícola en gran escala. Formaban parte de la alimentación de los animales de tiro y otros animales y como base para la producción de abonos orgánicos, que eran esenciales para el mantenimiento de la fertilidad. En la pequeña agricultura y en la agricultura a niveles de subsistencia, los residuos agrícolas mantienen y aumentan su importancia a razón del acceso cada vez más limitado a la tierra de pastoreo, debido al incremento del área cultivada. Con los cambios en las tecnologías de producción de la agricultura mecanizada, se pensó que la paja podía tener menor valor y podía ser quemada en el campo. Sin embargo, la legislación ambiental y el desarrollo del tratamiento de la paja para mejorar su digestibilidad, han eliminado la quema de la misma en la mayoría de los países desarrollados, donde ahora es usada para alimentar el ganado.

¹ Matthew D. Summers, Sherry L. Blunk, Bryan M. Jenkins. How Straw Decomposes: Implications for Straw Bale Construction [online]. California, 2003. [Consulta: 10 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.ecobuildnetwork.org>>

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.2.2 Cultivo

El trigo o el centeno son cultivos de secano y su recolección se suele realizar desde mediados de Mayo hasta finales del otoño, dependiendo de la región, siendo el método de recolección más utilizado el mecánico. El momento más conveniente para realizar la siega es aquel en el que los tallos han perdido por completo su color verde y el grano tiene suficiente consistencia. El corte del tallo se hace a unos 30 centímetros del suelo y la altura se mantiene regulada por la máquina.

Tradicionalmente, la recolección del grano de los cereales (conocido como *malla* en Galicia) se realizaba manualmente por grupos de segadores que se trasladaban de unas regiones a otras con utensilios muy rudimentarios. Estas labores manuales consistían en el segado del cereal con ayuda de hoces, agavillado o amontonado de la paja en pequeños bloques, y el atado y transporte en carretas hasta la era. Una vez allí, los hombres del pueblo procedían a golpearlo en el suelo con unos palos llamados “males” hasta que separaban por completo la paja del grano. Hoy en día son unas grandes máquinas las que se desplazan a la finca para realizar la recolección, cortan la planta y realizan la separación del tallo y el fruto, almacenando este último en unos depósitos y expulsando la paja. Ésta queda colocada en hileras sobre el terreno, de forma que facilita la posterior tarea de embalado.



Fig. 1.2- Cultivo de trigo aún no maduro



Fig. 1.3- Malla tradicional con males [http://www.lavozdeg Galicia.es]

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN



Fig. 1.4- Máquina recolectando el trigo



Fig. 1.5- Máquina descargando el trigo



Fig. 1.6- Hileras de paja después de la recolección del trigo

1.2.3Embalado

El embalado se realiza para evitar el deshilachado de los bordes y para mantener la compactación. Este proceso se realiza con la máquina de embalar, que realiza las tareas de cortado de paja, compactado de la misma y el propio embalado por medio de cuerdas de material plástico o metálico. El número de cuerdas varía de una máquina a otra, según el tamaño de la bala que forme, aunque las más usadas para construcción son las de dos o tres cuerdas. Si se tratase de un ladrillo cerámico, las fibras de paja estarían colocadas en el sentido del tizón y las cuerdas las atarían perpendicularmente, en el sentido de la sogá (a lo largo de la bala).



Fig. 1.7- Máquina embaladora

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN



Fig. 1.8- Bala de dos cuerdas



Fig. 1.9- Bala de seis cuerdas



Fig. 1.10- Finca de trigo después del embalado

Dimensiones aproximadas de las balas según su número de cuerdas

Balas de dos cuerdas: 35-40 x 45 x 90-100 cm.

Balas de tres cuerdas: 35-45 x 70 x 110-120 cm.

Balas de seis cuerdas: 70-75 x 120 x 250-260 cm.

1.2.4 Características

La densidad de la bala es variable y se regula con un mecanismo que incorpora la propia máquina. Cuando se confeccionan con la finalidad de utilizarlas en la construcción deben alcanzar una densidad superior a un mínimo recomendado.

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

La paja recibe la compresión de la cabeza de la embaladora mecánica que empuja cantidades de paja a golpes en la cámara. Estos golpes, cuando comprimen, hacen una especie de pastillas de unos 10 centímetros de espesor. De esta forma, una bala típica consiste en una serie de módulos de unos 10 centímetros, comprimidos en el sentido longitudinal del fardo. Debido a que la embaladora está funcionando constantemente con una serie de golpes ligeramente diferentes y a que el atado lo realizará al final de uno de estos módulos, la longitud de las balas puede no ser uniforme, dando como resultado variaciones entre las balas de unos 2 o 3 centímetros.

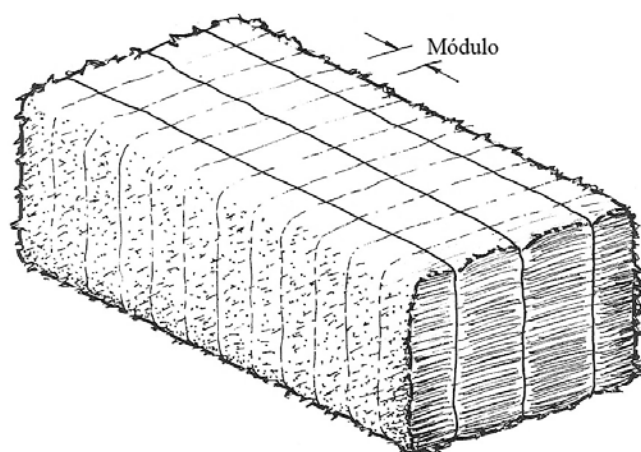


Fig. 1.11- Módulos que conforman la bala de paja. [Bruce King. Buildings of Herat and Straw. 1996]

1.2.5 Proceso de descomposición de la paja

Como ya se ha mencionado anteriormente, la paja es una fibra natural que puede llegar a durar muchos años bajo determinadas condiciones. También puede llegar a degradarse con mucha facilidad dependiendo de las condiciones en las que se encuentre, principalmente condiciones de humedad y temperatura. Con el control adecuado sobre el contenido de humedad, una estructura de balas de paja puede llegar a durar muchos años y así lo demuestran los casos de construcciones centenarias existentes.

La paja está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina. Esta composición la convierte en alimento potencial para microorganismos como hongos y bacterias que, bajo determinadas condiciones, pueden ser la principal causa de descomposición de la paja. No es el alimento ideal para estos microorganismos, pero la paja tiene nutrientes que favorecen su crecimiento. Las esporas de las bacterias o de los hongos están esperando para multiplicarse y están en la paja desde que ésta está en el campo.

Existen cuatro factores fundamentales que afectan al crecimiento de hongos y bacterias y, por tanto, al proceso de descomposición¹:

- contenido de nutrientes
- existencia de oxígeno en la paja
- temperatura de la paja
- contenido de humedad

Por estas razones, cuando los fardos se han mojado antes de ser colocados en el muro, ya han experimentado un proceso de crecimiento de microbios y, por lo tanto, tendrán mayor cantidad de esporas que se reproducirán posteriormente en el muro.

En términos de *nutrientes*, la paja tiene un contenido de nitrógeno inferior al óptimo para las mezclas de abono vegetal, lo que la convierte en un mal entorno para los microbios de descomposición. Otra regla

¹ Matthew D. Summers, Sherry L. Blunk, Bryan M. Jenkins. How Straw Decomposes: Implications for Straw Bale Construction [online]. 2003. [Consulta: 10 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.ecobuildnetwork.org>>



CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

general es que cuanto menos seca está la paja, más cantidad de nitrógeno posee, por lo que permitir un período largo de secado de la paja en el campo antes de ser cortada puede reducir la cantidad de nitrógeno en ésta cuando ya está embalada.

La presencia de *oxígeno* es otro factor importante para el crecimiento de los microbios. Las bacterias necesitan respirar oxígeno mientras utilizan los nutrientes de la paja. Aunque la cantidad de aire que tiene una bala es muy grande, el contenido de oxígeno en ésta es rápidamente consumido y sustituido por dióxido de carbono durante la respiración de estas bacterias. Si se impide la incorporación al fardo de nuevas cantidades de oxígeno, como ocurre con los muros enfoscados, se retrasará el proceso de descomposición.

La *temperatura* es un parámetro importante para el crecimiento de los microorganismos. Por debajo de 0°C estas pequeñas formas de vida no pueden existir porque el agua se congela. Muchos hongos y bacterias no pueden sobrevivir a temperaturas inferiores a 10°C por lo que su crecimiento no será muy activo a bajas temperaturas. La temperatura óptima para su crecimiento se encuentra entre los 20°C y los 65°C. y por encima de esta temperatura la mayoría de estas especies no pueden sobrevivir¹.

El contenido de *humedad* es el factor que inicia la descomposición en la paja. Esto ha sido estudiado detalladamente y, para evitar la putrefacción de muchos alimentos, se ha determinado la relación entre el contenido de agua y el crecimiento de microorganismos. Estudios iniciales han determinado que, para la paja, el crecimiento de hongos sólo se produce con valores de contenido de humedad superiores al 15%-18% del peso seco. Otros estudios han determinado que la paja de arroz puede alcanzar una humedad del 27% antes de iniciarse el proceso de descomposición gracias a su alto contenido en sílice. En estudios posteriores, solamente las muestras con un contenido de humedad superior al 40% presentaban un crecimiento significativo de bacterias. Esto sugería que la paja podría soportar unos niveles elevados de humedad relativa sin sufrir un importante proceso de descomposición. Además, también demostraba la aptitud del material para soportar contenidos de humedad superiores al 15% aunque, por seguridad, se establecía el límite recomendable en el 25% del peso seco.

1.3 Producción y usos actuales de la paja

La producción de paja y los usos a los que se destina son variables, tanto entre zonas como entre países o, incluso, entre continentes. La gran mayoría de los países cuentan con organismos que se dedican a publicar datos estadísticos de sus actividades, como es el caso de España. En estas bases de datos se puede consultar información como la producción anual de vino, de patatas o de cereales pero, sin embargo hay otros temas de los que no se tiene información, como puede ser el de la producción de paja. Esto es debido a que en nuestro país la paja se considera un simple residuo del cereal, al que se le pueden dar pocos usos. La información que existe sobre los usos de este material puede conseguirse en artículos, libros sobre este tipo de cultivos o, incluso, en la sabiduría popular. Remitiéndonos a estas fuentes, se puede decir que en el interior de Galicia la paja es embalada con el formato pequeño de dos cuerdas y almacenada para poder ser utilizada a lo largo de los meses del otoño y del invierno. Sus usos son fundamentalmente dos: el de formar

¹ CONFER - Matthew D. Summers, Sherry L. Blunk, Bryan M. Jenkins, op. cit.





CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

parte del alimento del ganado y su empleo para formación de la “cama” de los animales, que es el lecho sobre el que se tienden para dormir. También se puede dar el caso, sobre todo cuando se trata de producciones pequeñas, de amontonar la paja y proceder a su quema. Para poder hacer esto es necesario un permiso de quema, simplemente por el hecho de tratarse de un fuego realizado en la época seca con peligro de incendio, pero no existe limitación alguna por parte de ningún organismo medioambiental, ya que el volumen de paja que se suele quemar es muy reducido.

La producción de paja en nuestro país es un dato que no se conoce. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación realiza una publicación mensual sobre la producción agrícola, pero estas publicaciones no poseen datos sobre la producción de paja, aunque sí ofrecen datos de la producción de cereales. De todos modos, a partir de los datos de la producción de una finca de trigo se puede establecer una relación orientativa para determinar la producción anual de paja.

Se conoce la producción de una finca de la que se han obtenido unos 150 Kg de trigo y se han conformado 30 balas de unos 10 Kg cada una (300 Kg de paja). De estos datos se extrae que por cada Kg de trigo se producen 2 Kg de paja. Este dato es muy variable pero para este cálculo rápido nos servirá.

En el año 2003 la producción de trigo en España fue de 6.019.000 toneladas¹ lo que supone aproximadamente unos 12 millones de toneladas de paja, únicamente de trigo.

1.4 Alternativas a la quema de la paja en EEUU

1.4.1 Introducción

En este apartado, nos vamos a centrar en los Estados Unidos porque esta es la cuna de la construcción con paja. Allí se han hecho, a lo largo de los años, muchas construcciones con paja, muchos estudios y se han publicado muchos artículos. Analizando sus trabajos, podemos extraer las conclusiones necesarias para saber más sobre esta forma de construir e incluso encontrar una justificación al origen de este tipo de construcciones.

Los Estados Unidos producen, desde hace mucho tiempo, una importante cantidad de cereales, destacando sobre todo la producción de trigo y la de arroz. La consecuencia que de esto se deriva es que, cada año, se ven en la necesidad de darle salida a una enorme cantidad de paja resultante de la recogida de los cereales, cantidad que llega a superar los 200 millones de toneladas² anuales. En la década de los 80 y principios de los 90, la práctica totalidad de la paja era quemada en el campo, causando un problema de contaminación ambiental. Cuando llegaba la época de la quema había zonas que estaban durante semanas cubiertas de humo y los hospitales llegaban a saturarse de pacientes con problemas respiratorios y de irritación ocular. Además, cuando la quema se realizaba en zonas próximas a las autopistas, en éstas había

¹ Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Superficies y producciones agrícolas [on line]. Agosto de 2005. [Consulta: 12 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.mapya.es/es/estadistica/pags/superficie/superficie.htm>>

² U.S. Department of Energy. House of Straw – Straw Bale Construction Comes of Age [on line]. Abril de 1995. [Consulta: 8 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.eren.doe.gov/buildings/documents/strawbale.html>>





CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

tramos de muy poca visibilidad y se han dado casos de grandes accidentes en cadena a causa del humo de la quema de la paja.

Como es evidente, la quema se convirtió en un gran problema al que había que darle una solución y, con esta finalidad, nació en 1991 el *Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning* (comité asesor sobre alternativas a la quema de la paja de arroz). Desde el año 1995 y cada dos años publican un informe sobre las alternativas a la quema de la paja de arroz.

El segundo informe publicado (1997) admitía que los principales obstáculos para la comercialización de productos transformados eran los costes de recolección, transporte y almacenamiento de la paja. También reflejaba los esfuerzos realizados para facilitar el uso de este material en distintas aplicaciones, que se materializaron en subvenciones concedidas para la manufactura de este material o en las leyes aprobadas para admitir el uso de la paja en las construcciones residenciales.

El trabajo realizado en este sentido surtió algún efecto, pero no todo el deseado. En el año 1991 se había aprobado la ley de reducción de la paja de arroz. Seis años después de su publicación aún no había una importante instalación comercial en construcción u operativa que pudiera tratar una importante cantidad de paja de arroz. Las más prometedoras tecnologías aún necesitaban investigación e inversión de capital para atraer a las compañías.

1.4.2 Ley de reducción de la quema de la paja de arroz de California de 1991

Esta ley contemplaba una previsión de reducción progresiva de la quema de paja de arroz y establecía para el año 2000 una quema de un máximo del 25% de la producción total. Además, a partir de este año sería necesario justificar la no existencia de alternativas viables antes de realizar la quema.

El descubrimiento de estas alternativas viables también era tarea del *Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning*, además de establecer una lista de objetivos prioritarios. El principal objetivo que se establecía era la utilización, en el año 2000, del 25% de la producción para fines no relacionados con el campo, es decir, la construcción, obtención de energía, fabricación de papel, etc. Esta previsión se estimaba imposible de cumplir sin una cooperación de las partes implicadas y un programa de ayuda a la investigación

1.4.3 Alternativas a la quema de la paja de arroz

Además de la quema al aire libre, se pueden identificar dos grandes alternativas para su utilización: las no relacionadas con el campo y las relacionadas con el campo. Las primeras incluyen el uso de la paja de arroz para producción de energía, construcción y fabricación, regulación ambiental y comida para el ganado. Las segundas se refieren a la incorporación de la paja a los campos de los cultivos.

De las aproximadamente 1,5 millones de toneladas de paja de arroz generadas entre los años 1996 y 1997 en California, unas 884.000 toneladas (57% de la producción) se usaron para temas relacionados con el campo. Para los no relacionados con el campo se utilizó un 0,6% del total.

Hacer un mejor uso de las alternativas no relacionadas con el campo para la paja de arroz requería una cooperación intensiva entre Estado y gobiernos locales, la industria del arroz, ecologistas y empresarios que pudieran usar la paja de arroz como materia prima. Ninguna de estas entidades podía, unilateralmente, crear





CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

alternativas para la paja de arroz; los esfuerzos en colaboración eran necesarios para repartir los riesgos financieros y tecnológicos de crear nuevos usos industriales para la paja de arroz.

El desarrollo de las alternativas no relacionadas con el campo en la década de los 90 había tenido una evolución inferior a la esperada por la ley aprobada en el año 1991. Además, el éxito de la puesta en práctica de las técnicas del *Advisory Committee* para promover el uso de la paja era incierto. Éstas son las razones que condujeron al Comité a proponer un cambio en la ley de quema de paja, para dar más tiempo a que las partes interesadas pudieran desarrollar estas alternativas.

Con los datos publicados en el informe correspondiente al año 2001 se comprueba que las previsiones eran más esperanzadoras de lo que en realidad sucedió. A falta de alternativas de uso de la paja de arroz, los cultivadores incorporan al suelo aproximadamente el 70% la paja que producen. Además, investigaciones y experiencias en el campo han demostrado que su incorporación al suelo puede dar lugar a problemas de enfermedades y la posibilidad de que se reproduzcan las malas hierbas.

Alternativas¹

Se identifican cinco categorías de alternativas a quema de paja de arroz:

No relacionadas con el campo

1.4.3.1 Obtención de energía

1.4.3.2 Construcción y fabricación

1.4.3.3 Regulación ambiental

1.4.3.4 Alimento para ganado

Relacionadas con el campo

1.4.3.5 Prácticas comunes

Estas alternativas son las que plantea el *Advisory Committee* para la paja de arroz, pero está demostrado que pueden ser válidas también para la paja de otro tipo de cereal. Al estar hablando de materiales que tienen diferencias en su composición, sería normal que tuviesen comportamientos distintos al de la paja de arroz, pero esto no impide su uso.

1.4.3.1 Energías alternativas

El alto contenido energético que tiene la paja de arroz hace que la obtención de energía sea una opción atractiva para el uso de este material. Existen varias opciones técnicas para la producción de energía a partir de la paja de arroz incluyendo: combustibles para transporte y combustibles químicos industriales, combustión directa, producción de etanol y digestión anaeróbica. Cada una de estas tecnologías produce un tipo diferente de energía y cada una usa la paja de una forma diferente². Por esta razón, el mercado y las restricciones de producción inherentes a cada una de estas energías son muy diferentes.

¹ CONFER - Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning [on line]. California, 1997. [Consulta: 7 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://ob.arb.ca.gov/smp/rice/aac/aac.htm>>

² CONFER - Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning, op. cit.





CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.4.3.2 Fabricación y construcción

La paja de arroz es un material celuloso, como la madera, que tiene potencial para usos similares a esta. Hay un número creciente de usos técnicamente viables para la paja de arroz en la fabricación y la construcción. Estos usos varían desde el uso directo de las balas de paja para la construcción hasta los muy sofisticados compuestos moldeados para repuestos de automóviles¹. Estos usos se pueden clasificar en dos categorías, describiendo dos procesos muy diferentes. En la primera categoría están esas opciones que requieren la reducción de la pulpa. Estas opciones incluyen la producción de papel y cartón, tablero de aglomerado y productos moldeados de biomasa. La segunda categoría incluye opciones que no necesitan reducir la pulpa como son la construcción con balas de paja, cierto tipo de tableros y compuestos, ladrillos de barro y paja o paneles.

A) Productos que requieren la reducción de la pulpa

La reducción de la pulpa es la operación principal en la obtención de estos productos. En esta operación se cambia la materia prima para una forma fibrosa capaz de ser conformada y unida para los distintos productos a los que puede dar origen².

B) Productos que no requieren la reducción de la pulpa:

Compuestos

El proceso patentado *Agronomic System* utiliza 70% de biomasa y 30% de plástico reciclado para producir un sustituto de la madera comercializado con el nombre de BioComp. El fabricante afirma que este material es más fuerte que la mayoría de las especies de madera. El material también se vende como resistente al agua, a los roedores, a los insectos y al sol. Además, como sucede con la madera, este puede ser cortado y clavado³.

La paja en la construcción

Materiales con fibras de refuerzo se han usado durante cientos de años en forma de ladrillos y otros productos y se siguen utilizando, pero hoy en día los usos de estas fibras han aumentado considerablemente.

Suecia ha sido pionera entre 1930 y 1940 en la fabricación de paneles o tableros de paja. Sin embargo, la producción comercial no tuvo lugar hasta 1941 en Alemania. Estos paneles están siendo producidos en muchas partes del mundo, como pueden ser Bélgica, Australia, China o Filipinas⁴.

Las máquinas de producción de paneles fueron inventadas y fabricadas por la compañía *Stramit* en Inglaterra, hace unos sesenta años, y posteriormente fueron vendidas por todo el mundo. La producción de este panel es un proceso de extrusión continua que realiza compresión, calentamiento, envoltura,

¹ CONFER - Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning, op. cit.

² CONFER - Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning, op. cit.

³ CONFER - Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning, op. cit.

⁴ CONFER - Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning, op. cit.



CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

enfriamiento y cortado. El único pretratamiento que necesita el material es la limpieza y el extendido antes de ser comprimido.

Un panel más grueso producido por *PYRAMOD International* se usa como sistema estructural para construcciones de una única planta de altura. Estos paneles tienen un espesor de entre 10 y 12 centímetros a diferencia de los anteriores que tenían 5 centímetros y eran usados únicamente para particiones interiores.

Igual que sucedía con los compuestos, para los paneles existe un gran número de compañías que comercializan productos similares, cada uno con sus aplicaciones y limitaciones pero que, de igual modo, son destinados a la construcción.

Además de estos productos mencionados anteriormente, existe otro muy importante y que no necesita energía para su transformación. Se trata de las balas de paja, que se utilizan de muchas formas pero, básicamente, apilando unas encima de otras. La energía necesaria para su obtención corresponde a la empleada por la máquina embaladora y a la utilizada para el transporte y almacenaje. De todos modos, las características de la construcción con balas de paja serán explicadas minuciosamente a lo largo de los próximos capítulos ya que es el tema central de este estudio.



Fig. 1.12- Panel Stramit de paja aglomerada



Fig. 1.13- Casa modular prototipo de PYRAMOD International
[<http://www.buildinggreen.com>]

1.4.3.3 Protección ambiental

La protección ambiental, en este contexto, se refiere al uso de materiales, como la paja de arroz, para el control de la erosión y para rehabilitación de zonas quemadas. La paja puede extenderse desembalada sobre esas áreas para proporcionar protección en suelos delicados o puede ser entrelazada para proporcionar una defensa en zonas de escorrentía y erosión¹.

La capacidad potencial de los proyectos de protección contra la erosión y protección de zonas quemadas es relativamente pequeña comparada con la cantidad de paja que está potencialmente disponible.

¹ CONFER - Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning, op. cit.



CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.4.3.4 Alimento para el ganado

La paja de arroz, así como la de otros cereales, es un buen alimento para rumiantes, aunque siguen siendo mejores otros alimentos, especialmente para animales en régimen de engorde, ya que la paja de arroz tiene un valor nutricional limitado. El contenido total de materia fibrosa de la paja de arroz es elevado mientras que el contenido de proteínas es bajo. El contenido reducido de proteínas significa un aporte insuficiente de nitrógeno al metabolismo de los microbios, lo cual dificulta la descomposición inicial de la paja¹. Además, el alto contenido de sílice no tiene valor nutritivo y puede interferir con el proceso digestivo. La paja de arroz es poco digestiva en comparación con heno de alfalfa.

1.4.3.5 Prácticas comunes

La forma más sencilla que los campesinos tenían para eliminar la paja de las fincas era quemarla en la propia finca. Las cenizas resultantes las extendían por el campo y cumplían cierta función de abono. Con la ley de reducción de quema de la paja, los agricultores necesitaban una forma rápida y económica de deshacerse de ésta y así fue como surgió la idea de incorporarla en el propio suelo. La realidad es que esta práctica no tiene muy buenos resultados, entre otras razones, por el tiempo que la paja necesita para su descomposición debido a su escaso contenido de nutrientes. Además, para incorporarla al terreno es necesario un trabajo laborioso y la utilización de maquinaria.

Con el paso de los años y tras la incorporación de la paja al terreno aumentan las posibilidades de que aparezcan plagas. El tiempo medio calculado para que se produzca la putrefacción del tallo en el suelo es de 1,9 años¹, por lo que un año de rotación de cultivo sería una ayuda, aunque no suficiente, para reducir las posibilidades de sufrir enfermedades serias.

1.5 El sistema constructivo

Casi sería más correcto hablar de los sistemas constructivos en plural porque, aunque todos tienen en común la sucesión de hileras de balas de paja, existen muchas formas de construir este tipo de paredes. Desde las primeras construcciones realizadas en torno al año 1900 hasta las estructuras actuales, se ha perfeccionado bastante la técnica y se estima que esta evolución continuará de aquí en adelante. Estas primeras construcciones surgieron de la necesidad de tener un refugio, fue así como se descubrieron las cualidades que este material tiene como aislante térmico. Las balas eran colocadas apoyando unas encima de otras hasta conformar un habitáculo que se cubría con algún material para protegerse de la lluvia. Con el paso del tiempo, los inquilinos de estas edificaciones se dieron cuenta de que necesitaban perfeccionar la técnica ya que la construcción que habían creado era poco estable y poco duradera. Hoy en día nos encontramos en un punto en el que existen edificios de dos plantas de altura en los que las balas de paja conforman una pared que sirve de soporte estructural a los montantes de una fachada trasventilada.

¹ CONFER - Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning, op. cit.





CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

El sistema constructivo empleado inicialmente fue bautizado con el nombre de “estilo Nebraska”, ya que es originario de esta zona de Estados Unidos. La simple sucesión de hileras de balas de paja les dio respuesta a sus necesidades, aunque no durante mucho tiempo, porque vieron que la construcción carecía de estabilidad y durabilidad. La pared era una acumulación de elementos independientes y esta inestabilidad se podía notar con vientos fuertes. Además, los usuarios de estas construcciones se dieron cuenta de que la paja tenía una durabilidad reducida al estar expuesta a las lluvias.

Una evolución de esta construcción surgió también en los Estados Unidos en una zona llamada Santa Fe. Allí realizaron las construcciones partiendo de una estructura de madera, que era bien conocida y resultaba bastante estable, y las balas de paja se colocaban en el perímetro de la estructura formando el cerramiento. Por aquel entonces, a principios de los 90, las paredes ya se recubrían con algún tipo de mortero que ofreciese protección a la paja frente a la lluvia.

Éstas son las dos grandes técnicas constructivas que presenta el sistema, una estructural y la otra de cerramiento con estructura auxiliar. A partir de estas dos se fueron realizando modificaciones y combinaciones encaminadas a conseguir la máxima estabilidad y durabilidad. La más inmediata fue la de vincular cada fila de balas a las contiguas mediante la clavazón de algún tipo de elemento lineal, inicialmente palos de madera. Otra forma de alcanzar esta estabilidad consistía en poner estos elementos lineales de forma vertical en cada lado de la pared y atar los que estaban enfrentados mediante un alambre en cada junta horizontal. Estos elementos verticales sirvieron para fijar las mallas metálicas que se pusieron en la superficie de la pared para mejorar la adhesión del recubrimiento al soporte.

La necesidad de darle mayor estabilidad a las paredes desembocó en la aplicación de una precompresión de la pared antes de realizar la estructura de cubierta o de techo. Los procedimientos para aplicar esta precompresión son variados, aunque todos tienen el mismo fin. Se puede conseguir con barras de acero corrugado, con alambres, o incluso con cintas plásticas de embalaje. Este proceso es muy importante de cara a obtener una estructura estable, por eso se han desarrollado varios sistemas y parece necesario seguir investigando en esta dirección para desarrollar un método práctico y efectivo.

Como se puede ver, lo que en un principio comenzó como algo improvisado, ahora está siendo estudiado para crear nuevos diseños que den respuesta a las necesidades que tiene el ser humano en lo que se refiere a espacios arquitectónicos. En la última década se ha multiplicado el número de publicaciones y de estudios relacionados con el tema. Este mayor conocimiento, sumado a tendencia actual de potenciar procesos en general más respetuosos con el medioambiente, es un factor que hace pensar que estamos tratando un tema con muchas posibilidades reales de desarrollo.



Capítulo 2

ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SITUACIÓN ACTUAL

CAPÍTULO 2 – ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SITUACIÓN ACTUAL

2.1 Historia de la construcción con paja

La paja es uno de los materiales de construcción conocidos más antiguo. Combinado con el barro, se ha utilizado durante miles de años (en Mesopotamia ya se construía de esta forma en el año 6000 a.C.). La paja proporciona una resistencia a tracción a los adobes y además tiene el mismo efecto cuando se utiliza en recubrimientos de paredes. En Alemania existen más de 500 casas y en Inglaterra más de 100.000 casas de barro y paja que aún se siguen utilizando como viviendas¹. Se puede decir que la construcción con paja es un redescubrimiento de un material que ya había sido utilizado desde que el ser humano ha empezado a construir².

El nacimiento de la construcción con balas de paja es relativamente reciente, ya que surge con la invención de máquina de embalar, hecho que tiene lugar en los Estados Unidos en torno al año 1850. Esta máquina se fabricó para dar respuesta a la necesidad de transportar y almacenar heno y paja. Los ladrillos extra grandes y ligeros que resultaban de este proceso fueron vistos como un material útil para la construcción, como demuestran la cantidad de patentes de aplicaciones constructivas en los Estados Unidos en esta época³.

A finales de 1800, los colonos europeos empezaron a llegar a las colinas de Nebraska y se encontraron con que los materiales de construcción de la zona, como podía ser la madera, eran muy escasos y demasiado caros. Fue de esta forma como se decidieron a construir con los fardos de paja, de forma provisional, mientras no conseguían materiales de construcción. Comenzaron a colocar unos fardos sobre otros y clavándolos con estacas de madera de forma que consiguieron una estructura portante. Este es el denominado estilo portante o estilo Nebraska, que recibe su nombre por el lugar en el que se inventó. La primera casa (documentada) de balas fue construida en esta zona, cerca de Alliance, por la familia Burke, y era de heno. Hay datos que indican que fue construida en el año 1896⁴ y otros que dicen que fue en el 1903⁵. La enfoscaron por dentro y por fuera y la cubrieron con un tejado a cuatro aguas. Los, aproximadamente, 85 metros cuadrados que tenía eran suficientes para la familia, que tenía cinco hijos. Esta casa la abandonaron en 1956 para trasladarse a una casa de granja normal⁶.



Fig. 2.1- Casa de la familia Burke. La casa aún existe después de más de un siglo. A pesar de que ha tenido poco mantenimiento desde los años 50, los muros aún estaban en buenas condiciones cuando fueron inspeccionados en 1993. [Nathaniel Corum, op. cit.]

¹ CONFER – Red de construcción con balas de paja. Breve historia [on line]. [Consulta 28 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.casasdepaja.com>>

² Daniel Smith and Associates (DSA) Architects. History [on line]. [Consulta 28 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.dsaarch.com>>

³ Kelly Lerner. History of Strawbale [on line]. [Consulta 1 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.one-world-design.com>>

⁴ CONFER – Red de construcción con balas de paja, op. cit.

⁵ Nathaniel Corum. Building a Straw Bale House: The Red Feather Construction Handbook. Primera edición. New York: Princeton Architectural Press, 2005. 181p. ISBN 1-56898-514-2

⁶ CONFER - Leanne R. Marks. Straw-bale as a viable, cost effective and sustainable building material for use in southeast Ohio. Thesis presented to the faculty of the college of Arts and Sciences of Ohio University ,2005. 118p.

CAPÍTULO 2 – ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SITUACIÓN ACTUAL



Fig. 2.2- La casa de la familia Simonton, Purdum, Nebraska (1908) – Estructura de balas de paja de heno. [Nathaniel Corum, op. cit.]



Fig. 2.3- Casa de balas de heno - Faunk Lake Ranch – Nebraska 1925-2000 [Kelly Lerner, op. cit.]

Los colonos se dieron cuenta de que la paja era un material térmicamente muy aislante, fácil de trabajar y barato. Por estas razones, entre los años 1896 y 1945 fueron construidas en Nebraska unas 70 construcciones (documentadas), entre casas, granjas, iglesias, talleres y almacenes. De estas 70, aún existen en la actualidad unas 13¹.

Lucille Cross, que vivió durante muchos años en Nebraska, recuerda que la casa de balas de heno en la que pasó su infancia era tan resistente que estando en ella, mientras jugaba a las cartas con su familia, pasó cerca de ellos un tornado del que no se



Fig. 2.4- Primera iglesia de balas de paja, Arthur NE (1920) [Leanne R. Marks, op. cit.]

¹ CONFER – Kelly Lerner, op. cit.

CAPÍTULO 2 – ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SITUACIÓN ACTUAL

percataron en absoluto hasta que los vecinos fueron a buscarlos y los encontraron tan tranquilos con las cartas en la mano¹.

En Wyoming, las estructuras de balas de paja han resistido una dura climatología y terremotos. La casa de Check Bruner que vivía en una de estas casas no sufrió ninguna grieta tras un terremoto, de aproximadamente 5,5 grados², que tuvo lugar en 1970.

El siguiente gráfico representa los estados de EEUU que en 1994 tenían construcciones con balas de paja. Los que tienen marcado un rectángulo son los que tienen construcciones históricas (anteriores a 1940) y los que están sombreados son los que tienen construcciones modernas³.

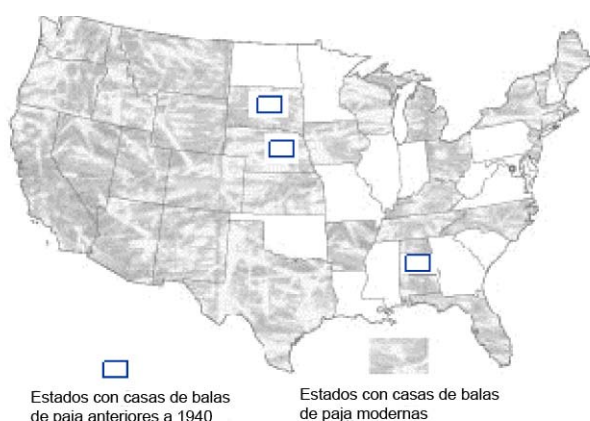


Fig. 2.5- [U.S. Department of Energy. House of Straw – Straw Bale Construction Comes of Age [on line]. Abril de 1995]



Fig. 2.6- La Maison Faillette , Montargis (Francia 1921) [Revista Bio-Construction]

En Europa, la casa de fardos de paja más antigua conocida fue construida en Montargis (Francia), en 1921⁴. A partir de 1940, bien a causa de la 2ª Guerra Mundial o bien a la presión de los empresarios del

¹ CONFER - U.S. Department of Energy. House of Straw – Straw Bale Construction Comes of Age [on line]. Abril de 1995. [Consulta: 8 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.eren.doe.gov/buildings/documents/strawbale.html>>

² CONFER - U.S. Department of Energy, op. cit.

³ CONFER - The Last Straw Journal [on line]. Lincoln Nebraska. The Green Prairie Foundation for Sustainability, 1994. [Consulta: 26 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.thelaststraw.org/contact/html>>

⁴ CONFER – Red de construcción con balas de paja. Breve historia [on line]. [Consulta 28 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.casasdepaja.com>>

CAPÍTULO 2 – ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SITUACIÓN ACTUAL

cemento, este tipo de construcción cayó en desuso. La mayoría de estas casas han sido abandonadas pero aún quedan algunas que están en buen estado y se siguen utilizando.

También en Nebraska, cerca de Garden, construyó la familia Scott su casa de balas de paja en 1935. Una embaladora que funcionaba con el movimiento de los caballos fue utilizada para dar formato a las balas de paja de trigo de la zona. Aún está en buenas condiciones y es una prueba de la durabilidad de estas construcciones.



Fig. 2.7- Casa de la familia Scott en Garden, Nebraska – 1935 [Building a Straw Bale House: The Red Feather Construction Handbook, op. cit.]

El renacimiento de la construcción con balas de paja empezó en 1973 con un artículo sobre el tema escrito por Roger Welsch para el libro “Cobijos”. Parece ser que este libro sirvió de inspiración a muchas personas que comenzaron a construir con este material. En el año 1983 se le dio mucha publicidad a la construcción del estudio de John Hammond, construido con balas de paja, aumentando aún más el interés por el tema¹.



Fig. 2.8- Straw Bale Studio de John Hammond [www.geocities.com]

En el año 1991 se publicó el primer libro sobre construcción con paja que fue escrito por S.O. Macdonald². A principios de los 90 tuvo lugar un considerable aumento de artículos en periódicos, de cobertura televisiva y de talleres de construcción enfocados a la construcción para un número limitado de edificios de balas de paja sin carga (estilo

Santa Fe). La primera casa de balas de paja permitida fue también la primera asegurada y financiada por un banco y fue en Tesuque, Santa Fe (Nuevo México), en 1991. La propietaria, y autoconstructora, era Virginia Carabelli y la casa era de este estilo³. Tenía una superficie de 130 m², contaba con calefacción por suelo radiante y había sido diseñada por el arquitecto local Ken Figuerado⁴.

¹ CONFER - Daniel Smith and Associates (DSA) Architects, op. cit.

² CONFER – Red de construcción con balas de paja, op. cit.

³ CONFER - Athena Swentzell et al. The Straw Bale House: Designing and Building With a Resource-Efficient Material (Traducción al Español). Chelsea Green Publishing Company, 1994. 300 p. ISBN 0930031717

⁴ U.S. Department of Energy. op. cit.

CAPÍTULO 2 – ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SITUACIÓN ACTUAL



Fig. 2.9- Casa de Virginia Carabelli (estilo Santa Fe) – Nuevo México (House of Straw – Straw Bale Construction Comes Age – U.S. Department of Energy – 1995)

En Septiembre de 1993 tuvo lugar en Arthur (Nebraska) la primera conferencia sobre los edificios de balas de paja llamada “Roots and Rebird” (raíces y renacimiento), a la que asistieron cincuenta arquitectos, constructores, diseñadores y entusiastas. En esta conferencia surgió la idea de crear el “National Straw Bale Research Advisory Network” con el objetivo de compartir información que facilitase los trabajos de investigación¹. En Octubre de 1993, Judy Knox y Matts Myhrman empezaron a construir la primera casa de balas de paja de estructura portante con permisos de construcción².

También se fundó la asociación “Out on a Bale” y en el año 1993 Matts Myhrman y Judy Knox iniciaron la publicación de un periódico llamado “The last Straw Journal”¹. Este nació con la intención de extender los conocimientos y promover buenas prácticas constructivas. Actualmente existen casas de paja en Méjico, EEUU, la mayoría de países de Europa, África, India e incluso en China y cada año aparecen unas 1000 construcciones nuevas de este estilo.

A finales de la década de los 90 surge una nueva organización llamada “Builders Without Borders” (BWOB) (Constructores Sin Fronteras), a partir de un encuentro de personas que tuvo lugar en Kingston, Nuevo México (EEUU). Es una organización internacional de constructores con materiales naturales, asociados con comunidades y organizaciones alrededor del mundo para crear viviendas de bajo coste y con materiales locales para trabajar juntos por un futuro sostenible³.

¹ CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.

² CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.

³ CONFER – S. O. MacDonald. Una introducción visual a la construcción con fardos de paja, 1999 (versión en Español). 22p.



CAPÍTULO 2 – ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SITUACIÓN ACTUAL

2.2 Situación actual en la escena internacional

A principios de los años 80 empezaron a aparecer estructuras con fardos de paja en Québec (Canadá). En 1981 François Tanguay construyó una casa de estructura de madera y cerramientos de balas de paja al sureste de Québec¹.

En 1982 la “Canada Mortgage and Housing Corporation” (CMHC) proporcionó fondos a través de “Housing Technology Incentives” (Incentivos para Tecnología de Vivienda) para demostrar las aplicaciones de un sistema de balas de paja y mortero para muros de carga para viviendas. Louis Gagné de Huli (Québec) desarrolló un sistema de muros llamado matriz de paja, para ser estudiado en el programa, que consistía en el apilado de balas tomadas con mortero².

Kim Thompson, de Nueva Escocia, y un grupo de amigos construyeron en Canadá en 1993 un edificio usando muros de carga de siete balas de altura en la primera planta y de tres en la segunda, con un techo de catedral. Este edificio se apoyaba sobre una plataforma elevada de madera que, a su vez, estaba aislada térmicamente con fardos de paja entre las vigas del suelo³.

En Europa, a principios de los años 90, Tapami Marjamaa construyó la primera estructura de balas de paja en Finlandia sin saber que construcciones similares estaban siendo construidas en otras partes del mundo. En la actualidad, continúa investigando para conseguir una normativa nacional para las balas de paja⁴.

La primera construcción con paja en el Reino Unido se realizó en el año 1994 y en la actualidad ya son más de 70 en el Reino Unido y de 10 en Irlanda, algunas de ellas con los permisos necesarios para su construcción⁵.

Aquí en Europa existe la asociación “European Strawbale Network” desde el año 1998 y se reúne cada dos años en un lugar distinto de Europa. Existe también otra asociación a nivel internacional llamada “Ontario Straw Bale Building Coalition” que, también cada dos años y en un país distinto, se reúne y organiza conferencias. Las últimas han sido en California, Nebraska, Australia y Dinamarca, y entre el 24 de Septiembre y el 1 de Octubre de 2006 se han reunido en Canadá para intercambiar información y técnicas constructivas.

En la actualidad son muchas las asociaciones en todo el mundo que trabajan para estudiar y dar a conocer los distintos procedimientos de construcción con balas de paja. También es destacable el trabajo de investigación realizado en universidades de todo el mundo y el de personas aficionadas a este tipo de construcción que, de alguna forma, se dedican a difundir sus conocimientos en beneficio de la cultura.

La paja es un recurso natural, de producción anual, ecológico y barato. Estas son algunas de las razones que han impulsado a algunos organismos a crear proyectos de desarrollo en zonas de escasos recursos económicos con construcciones hechas con balas de paja.

¹ CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.

² CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.

³ CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.

⁴ CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.

⁵ CONFER – Barbara Jones. Information Guide to Straw Bale Building [on line]. Amazon Nails, 2001. [Consulta: 27 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalefutures.org.uk>>



Capítulo 3

LA CORRIENTE DE LA CONSTRUCCIÓN ECOLÓGICA



CAPÍTULO 3 – LA CORRIENTE DE LA CONSTRUCCIÓN ECOLÓGICA

3.1 Consumo energético actual

Transformar el sistema energético actual del estado español en sostenible supone un cambio de conciencia sin parangón. Un análisis inicial del sistema energético español indica que las necesidades energéticas se incrementarán en un 52% en el período 2000-2010 y que el consumo de energía primaria está basado en un 83% en combustibles fósiles (con sus efectos de calentamiento global y contaminantes atmosféricos), un 13% procede de centrales nucleares (con las consecuencias derivadas de la generación de los residuos radiactivos) y sólo un 4% con energías renovables¹.

En el año 1997, según el U.S. Commerce Department, alrededor del 36% del consumo total de energía en los EEUU fue destinada a operaciones comerciales (16%) y a edificios residenciales (20%). Esto representa casi el 9% del consumo mundial de energía en ese año y está próximo a la cifra de consumo de energía de la producción mundial de cemento². La industria de la construcción consume más recursos energéticos que ningún otro sector de la economía, tanto en Estados Unidos como en el mundo³.

Vivimos en un mundo en el que los recursos naturales están siendo consumidos a un ritmo acelerado y las técnicas actuales de construcción contribuyen de forma considerable a este proceso⁴. El daño que se le está haciendo al medio ambiente es, en muchos casos, irreversible, pero es un daño que se puede controlar. Uno de los mayores factores de contaminación se encuentra en los edificios. Éstos emplean más de la mitad del total de la energía eléctrica que se consume en el mundo desarrollado, y producen otro tanto de los gases que provocan el efecto invernadero⁵.

El principal efecto de los edificios sobre el medio ambiente se produce a causa del consumo de energía durante su vida útil, por lo que la principal prioridad, en la mayoría de los casos, consiste en diseñarlos con una mayor eficiencia energética. Las estrategias ecológicas que se pueden aplicar en este caso son: mejorar el aislamiento, utilizar vidrios de baja emisividad, emplear fuentes de energía renovable, instalar electrodomésticos de bajo consumo, y diseñar y orientar los edificios de manera que aprovechen la energía solar reduciéndose al máximo la pérdida de calor (y lo contrario en las zonas cálidas)⁶.

3.2 La construcción ecológica

La corriente de la construcción ecológica que está presente en los EEUU no es simplemente un fenómeno. Se trata de un movimiento representado, en los comienzos del siglo XXI, por un conjunto de tecnologías de construcción no industrializadas, principalmente utilizadas para usos residenciales. Estas incluyen los tradicionales y modernos sistemas de barro y paja además de los de estructura de madera o mampostería de piedra.

La construcción ecológica es mucho más que los materiales y la ejecución de los muros. Es más bien una filosofía que, junto con una visión global del mundo, trata a la tierra, no sólo como algo sagrado, sino

¹ Ismael Caballero. La huella ecológica del Estado Español en el sector energético. EcoHabitar. Nº11. Otoño de 2006. Olba, Teruel. Ed. ECOHABITAR S.L. ISSN:1697-9583

² Doxley, 2000 - Leanne R. Marks, op. cit.

³ Roodman, 1994 - Leanne R. Marks, op. cit.

⁴ Roodman, 1994 - Leanne R. Marks. Straw-bale as a viable, cost effective and sustainable building material for use in southeast Ohio. Thesis presented to the faculty of the college of Arts and Sciences of Ohio University ,2005. 118p.

⁵ Elizabeth Wilhide. ECO. 1ª edición en lengua española. Barcelona. Editorial Blume, 2004. 184p. ISBN:84-95939-77-0

⁶ Elizabeth Wilhide, op. cit.





CAPÍTULO 3 – LA CORRIENTE DE LA CONSTRUCCIÓN ECOLÓGICA

también como vivo. Sus defensores se preocupan por lo que suponga un ambiente saludable y por cómo construir con el mínimo impacto para la naturaleza¹. Las estructuras son entendidas no sólo como entidades aisladas sino como parte integrante de la propia naturaleza.

En contraposición a una dependencia total de calefacción, ventilación y enfriamiento mecánicos, que consumen cantidades enormes de energía contaminante, los edificios de construcción ecológica son diseñados pensando en la sensibilidad del lugar, el sol, los vientos predominantes y las estaciones. Estos proporcionan un confort saludable y económico además de preservar la tranquilidad en los espacios interiores.

Este movimiento también se caracteriza por la apreciación de los materiales de construcción no procesados o procesados de forma mínima, para apreciar la belleza de la tierra sin tratar o de las piedras sin cortar².

Muchas personas que forman parte del movimiento denominan este tipo de construcción como “alternativa” para que no sea percibido como cuestionable y, de alguna manera, dificultar su entrada en la corriente principal de la construcción. Hay esperanza de que los historiadores arquitectónicos miren atrás hacia este tiempo y noten la extensiva aparición de la construcción natural como el origen de una nueva era de construcción, basada en principios de equilibrio ambiental³.

Entender la construcción ecológica como algo normal no está demasiado lejano. En Octubre de 1999 el *American Institute of Architects Committee on Environment* organizó una conferencia en Chattanooga para investigar la “corriente ecológica”⁴. En las últimas décadas, la arquitectura “ecológica” ha pasado de una presencia simbólica a una presencia de enorme peso. Durante este período se ha definido ampliamente como una construcción convencional que ha sido mejorada para cumplir las mayores exigencias ambientales.

Los años 90 también han presenciado el incremento del interés por la “sostenibilidad”, que apareció en el lenguaje popular en este período y hoy en día es usado para describir casi cualquier respuesta a asuntos ambientales. Como es lógico, la sostenibilidad está siendo asumida rápidamente por casi cualquier institución cívica como objetivo a cumplir. Esto parte del reconocimiento de que el sistema operativo de nuestra sociedad no es capaz de mantenerse, de seguir su curso habitual.

Algunos describen el problema como un “paso cambiado” con la naturaleza. Por esta razón apareció también durante la última década en Suecia un movimiento llamado “Paso natural”. Su misión es ajustar las malas alineaciones de nuestra cultura industrializada con los sistemas operativos naturales⁵. De esta forma, los valores de desarrollo sostenible van de la mano como guías para las prácticas de construcción ecológicas.

3.3 El imperativo ambiental

Las estructuras ligeras de madera que abundan en los EEUU empezaron a proliferar solamente desde el final de la Segunda Guerra Mundial debido a que era un material barato. “Stick-frame”, como es

¹ Lynne Elizabeth y Cassandra Adams. *Alternative Construction: Contemporary Natural Building Methods*. New York, mayo 2000. 416 p. ISBN: 0471249513

² Lynne Elizabeth y Cassandra Adams, op. cit.

³ Lynne Elizabeth y Cassandra Adams, op. cit.

⁴ Lynne Elizabeth y Cassandra Adams, op. cit.

⁵ Lynne Elizabeth y Cassandra Adams, op. cit.



CAPÍTULO 3 – LA CORRIENTE DE LA CONSTRUCCIÓN ECOLÓGICA

popularmente conocido en los EEUU, no ha sido aceptado como sistema de construcción en otras partes del mundo hasta hace poco tiempo. Es triste que sea en este momento, cuando los bosques del mundo se están quedando sin árboles a una marcha sin precedentes, que las estructuras de madera estén atrayendo a constructores de países pobres en madera, donde la mampostería y otras técnicas autóctonas han predominado dentro de una ecología más o menos equilibrada durante siglos.

Los ecosistemas de nuestro planeta más notablemente amenazados por la explotación humana son los bosques. Se han perdido casi la mitad, unos tres mil millones de hectáreas (46%) de los bosques que cubrían la tierra originalmente, y la deforestación continúa creciendo. La mayor parte de estos bosques fueron talados durante el siglo XX para madera o para convertir la tierra a otros usos. Entre 1980 y 1990, unos 200 millones de hectáreas fueron taladas¹.

3.4 Principios de diseño

Los bosques antiguos soportan aproximadamente la mitad de la biodiversidad del mundo. También renuevan nuestro aire y estabilizan nuestro clima, pero hay muchas personas que consideran los árboles valiosos para combustible, construcción y papel. La construcción residencial de madera en los EEUU es una de las causas principales de la deforestación mundial. El 45% de toda la madera cosechada en el mundo entero en 1995 (3,33 billones de metros cúbicos) fue usada para la industria de la madera; ésta es la que se usa para hacer leña, papel, madera contrachapada y productos similares. Cerca del 25% de toda esta madera es consumida en los EEUU y, de esta, el 40% o más es usado en la construcción². Resumiendo, alrededor del 10% de la producción mundial de madera es usada por la industria de la construcción de los EEUU, y la mayor parte para construcciones residenciales.

La demanda de viviendas en este país continúa creciendo, así como también lo hace la presión sobre los recursos naturales, y es esta demanda la que más afecta a los bosques³. Los americanos usan más madera que ningún otro recurso natural, más que acero, plástico y hormigón juntos⁴.

A pesar de esta urgente necesidad de parar la deforestación, las cifras que se manejan en la actualidad no reflejan que esté disminuyendo significativamente.



Fig. 3.1- Aspecto inicial de un bosque (Patricia Cebada y Rubén Solsona. Casas Sanas y Ecológicas con Muros de Paja – 2005)



Fig. 3.2- Aspecto del bosque después de una teórica deforestación selectiva (Patricia Cebada y Rubén Solsona. Casas Sanas y Ecológicas con Muros de Paja – 2005)

¹ Lynne Elizabeth y Cassandra Adams, op. cit.

² Lynne Elizabeth y Cassandra Adams, op. cit.

³ Roodman, 1994 - Leanne R. Marks, op. cit.

⁴ Doxley, 2000 - Leanne R. Marks, op. cit.



CAPÍTULO 3 – LA CORRIENTE DE LA CONSTRUCCIÓN ECOLÓGICA

Organizaciones como la *National Association of Home Builders* y la *Natural Resources Defense Council* han publicado recomendaciones para reducir la demanda de madera, recomendaciones que incluyen técnicas estructurales más eficientes. Teniendo en cuenta, sin embargo, el crecimiento demográfico y el hecho de que el tamaño medio de una vivienda unifamiliar en los EEUU ha aumentado de los 102 m² en 1949 a los 180 m² en 1990, todas estas medidas para mejorar la construcción con madera, incluso combinadas, parecen como mucho una solución provisional¹.

Las otras amenazas para la salud, causadas por la construcción industrializada, incluyen toxinas que emanan de edificios y contaminación generada por la extracción y la fabricación de materiales de construcción. El transporte de las materias primas que se usan para obtener productos de construcción y el transporte mismo de estos productos a las obras son causantes del consumo de energía y contaminación de todo tipo.

La construcción con materiales obtenidos en la zona y sin tratar, materiales tan simples como la tierra de debajo de nuestros pies, es una respuesta natural a esta crisis. Esto reduce las cantidades de energía y recursos necesarios para la extracción, procesado, fabricación y transporte. Tierra, adobes, enfoscados de barro y paja y muros de balas de paja son sistemas que pueden reducir la demanda de madera. Diseñar con calefacción, ventilación, refrigeración e iluminación natural puede favorecer una reducción del consumo de energía y de recursos evitando mucha contaminación.

Con tantos beneficios para nuestra salud y para el medio ambiente, los materiales no industrializados y sistemas de construcción ecológicos están recibiendo amplios reconocimientos como soluciones. Artículos sobre estos temas están apareciendo con una frecuencia creciente en los medios de comunicación e incluso hay Universidades que se están preocupando por dar a conocer alternativas a la construcción tradicional.

3.5 Valoraciones ambientales

Para que una construcción sea respetuosa con el medio ambiente ha de tratar de utilizar productos reciclados, no tóxicos, que necesiten poca energía para su obtención y que se encuentren disponibles en la zona². Pero el proceso de elección del material de construcción pensando en el medio ambiente es más complejo que hacer estas simples elecciones. Esto es debido al hecho de que cada material de construcción, cada sistema de construcción y cada práctica constructiva tienen un impacto ambiental distinto a los demás a lo largo de su ciclo de vida, empezando por su extracción y terminando con la demolición de la construcción y el reciclaje de los escombros³.

Existen programas informáticos que han sido desarrollados hasta el punto de que son capaces de calcular los impactos ambientales relacionados con el consumo de energía. Estos tienen su aplicación principal en la fase de diseño para determinar qué consumo energético tendrá una construcción cada año, o incluso para comparar tipos de construcciones con el objetivo de elegir la que tenga mayor eficiencia energética.

¹ Roodman, 1994 - Leanne R. Marks, op. cit.

² Doxley, 2000 - Leanne R. Marks, op. cit.

³ Lynne Elizabeth y Cassandra Adams, op. cit.



Capítulo 4

LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA



CAPÍTULO 4 – LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA

4.1 Introducción

La arquitectura bioclimática se puede definir como aquella que se preocupa por la relación entre el clima, la arquitectura y los seres vivos. Hay autores que la califican como arquitectura sostenible porque la entienden como consumidora de materiales y sustancias con criterios de sostenibilidad, es decir, sin poner en riesgo su uso por generaciones futuras. Además, representa el concepto de gestión energética óptima de los edificios mediante la captación, acumulación y distribución de energías renovables pasiva o activamente, y la integración paisajística y empleo de materiales autóctonos y sanos¹.

Este tipo de arquitectura representa la vuelta a los criterios elementales del sentido común. Representa la arquitectura que se ha hecho y que ha estado basada en la lógica y, por tanto, fundamentada en criterios igualmente razonables con respecto al clima.

Construir con balas de paja se puede considerar ecológico ya que la paja es un material abundante y un recurso renovable. Son muchos los países del mundo en los que se necesita encontrar una utilidad al material resultante de las cosechas de cereal, por lo que la construcción se convierte en una buena consumidora de este excedente. Además, la energía necesaria para la obtención de las balas de paja supone un incremento mínimo con respecto a la necesaria para la recolección de cereal, resultando un material con un coste energético mínimo. Si a estas características le sumamos las que hacen de la paja embalada un material con buenas prestaciones acústicas y, sobre todo, térmicas, nos encontramos ante un material de construcción que encaja a la perfección en los criterios de arquitectura bioclimática.

Una construcción bioclimática no se define únicamente por sus materiales, que sí son importantes, sino que también juegan un papel fundamental la forma de combinar estos, la forma de construir, la orientación del edificio, la distribución del espacio, la utilización de sistemas de captación de energía, y todo lo que nos podamos imaginar para reducir al mínimo el consumo de energías contaminantes. Entender estos conceptos se hace necesario antes de comenzar a proyectar o a construir un edificio respetuoso con el medio ambiente. Algunos de estos conceptos se analizan en el apartado siguiente.

4.2 Conceptos de arquitectura bioclimática

4.2.1 Introducción

La arquitectura se puede definir como el arte de crear espacios habitables para el ser humano. Desde el principio de los tiempos, el ser humano ha estado creando sus propios espacios para satisfacer las necesidades que se le presentaban. Éstas podían ser la de protegerse del frío o la lluvia o la de protegerse de los animales salvajes, y para ello iba configurando sus espacios a base de lo que la naturaleza le ofrecía, que en unos casos eran ramas de árboles y en otros piedras o incluso excavando en la tierra para hacer cuevas. Es así como surge la construcción, para materializar los espacios arquitectónicos que crean a partir de las necesidades que se les plantean.

Desde que el ser humano vivía en cavernas, sus necesidades han evolucionado mucho pero no dejan de ser eso, necesidades. Cuando se hace una vivienda o cualquier otro tipo de edificación, se hace pensando

¹ CONFER – F. Javier Neila González. Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible. Madrid. Editorial Munilla-Lería. Marzo 2004. 443 p. ISBN-84-89150-64-8





CAPÍTULO 4 – LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA

en que es necesario que se les proporcione a los usuarios una ventilación, una iluminación, confort térmico o protección frente a la lluvia. No cabe duda de que en la actualidad se pueden realizar construcciones complejas, con instalaciones avanzadas o mecanismos complicados encaminados a satisfacer ciertas necesidades de los espacios arquitectónicos. Antaño se podría considerar complicado o casi imposible realizar una construcción en la Antártida que tuviese una temperatura interior de 35°C, pero hoy en día, basándonos únicamente en criterios tecnológicos, es posible. Bien es cierto que es mucho más sencillo alcanzar esta temperatura en cualquier país del norte de África o de Centroamérica.

Parte, si no la totalidad, de las necesidades de ventilación, iluminación o calefacción se pueden cubrir simplemente utilizando los recursos que nos proporciona la naturaleza. Es tan sencillo como construir una casa en Túnez y no en la Antártida para no depender de una calefacción artificial. No siempre es tan sencilla la elección pero sí que existe siempre una solución que optimiza los recursos que tiene la naturaleza.

En los primeros tiempos del hombre, la temperatura se mantenía entre 16°C y 26°C y el confort se obtenía merced de los vientos alisios del Este. El techo y la ventana no habían sido inventados y la palmera proporcionaba la sombra necesaria. En una época posterior, el hombre debe recomponer las condiciones de confort óptimo e inventa los muros, la calefacción,... Hoy, en una vivienda climática, las personas que en ella viven, se levantan al Este, realizan su actividad diaria al Sur y se acuestan al Oeste. El habitante se convierte en actor, haciendo dinámica la ocupación de los espacios y respondiendo a las variaciones del clima. La concepción arquitectónica que integra los datos climáticos no se limita a la consideración pura y simple del hábitat como objeto, sino que favorece la relación dinámica fundamental del hombre con el medio¹.

4.2.2 Aspectos acústicos

La construcción puede dar respuesta a los problemas del ruido con materiales aislantes acústicos, absorbentes acústicos, combinaciones de materiales, etc. Puede darse el caso de que queramos construir una vivienda en una parcela grande y cerca de ésta pasa una carretera con mucho tráfico. Si construimos la casa cerca de la carretera y nos molesta el ruido, está claro que habrá que utilizar materiales o sistemas constructivos que disminuyan la percepción sonora en el interior. Por el contrario, si construimos la casa en una zona alejada de la carretera, es posible que no tengamos que realizar estas actuaciones o que la inversión en este sentido sea muy inferior.

4.2.3 Aspectos lumínicos

El sol sale por el Este y se pone por el Oeste. La península ibérica está comprendida entre los paralelos 32°Norte y los 48°Norte, de modo que en el mediodía ilumina desde una posición más cercana al Sur que al Norte, siendo esta cercanía más próxima en invierno que en verano a causa del movimiento de traslación de la tierra alrededor del astro sol. Esto significa que si en nuestra vivienda necesitamos una zona en la que estar mucho tiempo para realizar actividades para las que se necesita luminosidad, lo lógico es que

¹ José Antonio González González. Arquitectura Bioclimática. Colegio de Arquitectos de Galicia, Diciembre de 1997. 109 p. ISBN: 84-85665-28-7





CAPÍTULO 4 – LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA

sean estancias ubicadas en la parte sur de la vivienda. Esa misma luminosidad se puede conseguir en la zona norte, pero a base de utilizar energía eléctrica. En el hemisferio Sur sucede todo lo contrario.

4.2.4 Aspectos térmicos

El sol es, además de una fuente lumínica, una fuente calorífica. El soleamiento se caracteriza por la trayectoria del sol y por su duración, y las superficies sobre las que incide el sol pueden elevar su temperatura a diversos niveles según varios factores. Ciertas combinaciones de materiales pueden hacer que se obtenga la máxima cantidad posible de energía calorífica por los paramentos de la zona sur de la vivienda mientras que se evita en lo posible las pérdidas caloríficas por el resto de paramentos, especialmente los orientados al norte¹. Como fuente de energía, el soleamiento es el factor climático más aprovechable y además compensa las pérdidas térmicas del edificio². Para ello es necesario, por un lado, conocer la energía solar disponible para cada día y hora del año, y por otro lado, poder determinar para una hora elegida, el soleamiento efectivo en cada fachada del edificio.

Cuando una vivienda se ha situado de manera que pueda aprovechar o evitar la luz solar, la cantidad de energía necesaria para calentarla o para refrigerarla se reduce enormemente³.

4.2.5 Aspectos eólicos y pluviométricos

El sol y el agua son fuente de vida; sin estos dos elementos, la vida que hoy conocemos no existiría. Por otro lado, ambos son unos elementos con un poder inmenso para deteriorar o incluso destrozarse infinidad de materiales sobre los que tengan un efecto directo, incluso sobre las personas.

Los temporales de viento y lluvia son muy distintos de unas zonas a otras, tanto en intensidad como en direcciones predominantes del viento o en duración. Esta es la razón por la que las zonas más castigadas por el temporal deben ser protegidas de forma efectiva. Esta protección puede realizarse con materiales específicos para estas condiciones, configuraciones constructivas propias para esta finalidad o con elementos de protección tales como aleros de las cubiertas.

La orientación de la vivienda para la obtención de la mayor cantidad posible de energía del sol parte de una buena parcela. Si ésta se encuentra en una ladera situada al norte de una colina, la humedad y el frío se notarán en mayor medida ya que el sol incidirá menos tiempo sobre la vivienda. Esto no sólo influye en cuestiones físicas como puede ser la luminosidad o la temperatura, sino también en aspectos psicológicos. El sol provoca en los seres humanos ciertas reacciones químicas que generalmente dan como resultado sensaciones emocionales positivas. Que el sol incida en menor grado no significa que inmediatamente estas sensaciones no puedan existir, simplemente que se verán menos potenciadas.

¹ CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

² CONFER - José Antonio González González, op. cit.

³ Elizabeth Wilhide. ECO. 1ª edición en lengua española. Barcelona. Editorial Blume, 2004. 184p. ISBN:84-95939-77-0



4.2.6 Orientación solar

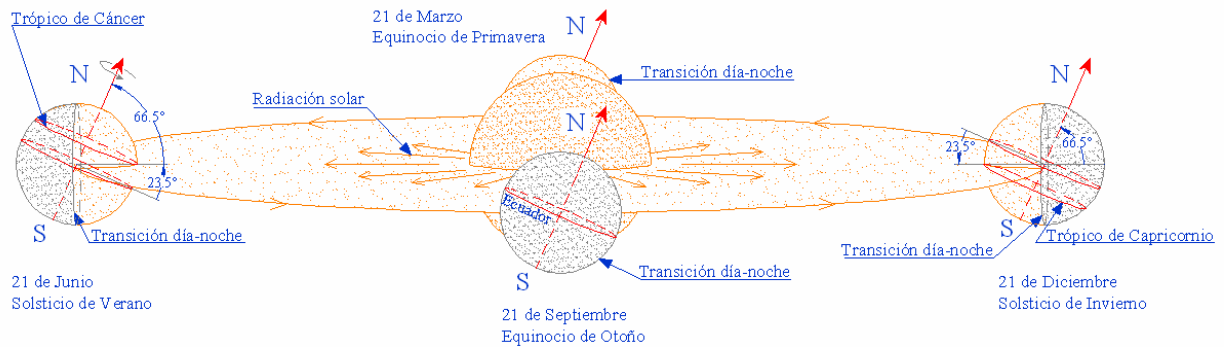


Fig. 4.1- Posiciones relativas de la tierra respecto al sol

La tierra se traslada alrededor del sol con el eje terrestre paralelo en todo momento a sí mismo, formando un ángulo con el plano de la eclíptica de $66^{\circ} 30'$ que permanece invariable. Se pueden establecer tres planos de referencia y que son el plano de la eclíptica, el plano ecuatorial y el plano horizontal de un punto P.

El plano de la eclíptica queda determinado por el centro del sol y dos posiciones cualesquiera del centro de la tierra.

El plano ecuatorial es el que contiene el ecuador.

El plano horizontal de un punto P es el perpendicular a la vertical donde se encuentra el punto P.

Además del movimiento de rotación sobre el eje que realiza la tierra, ésta realiza otro movimiento de traslación alrededor del sol de un año de duración. La trayectoria que describe se llama eclíptica por la elipse que describe.

La declinación solar es el ángulo de incidencia del vector radiación solar con respecto al plano ecuatorial, y varía entre $+23^{\circ}30'$ y $-23^{\circ}30'$, en función de la posición de la tierra en la eclíptica.

4.2.7 Altura del sol y acimut



Fig. 4.2- Ángulos de incidencia del sol en las superficies horizontales en invierno y en verano.

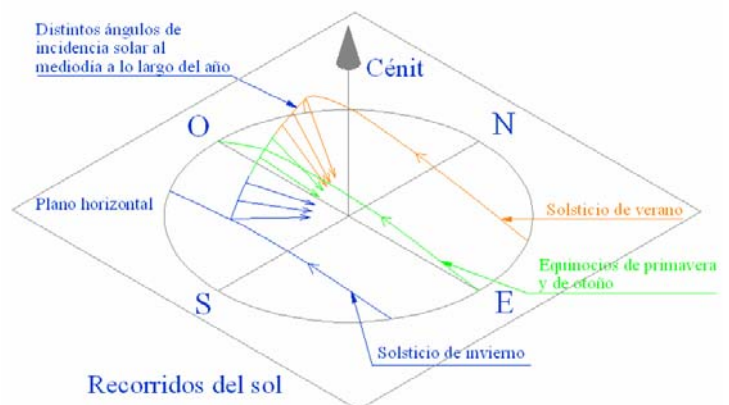


Fig. 4.3- Trayectoria solar en distintas épocas del año

CAPÍTULO 4 – LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA

La altura del sol es el ángulo que en cada momento forma su visual con respecto al plano horizontal de observación. El gráfico de la figura 4.3 representa el punto más alto y más bajo del sol en su recorrido. El más alto corresponde al solsticio de verano y el más bajo corresponde al solsticio de invierno. El recorrido en el que el orto y el ocaso se realizan precisamente por el Este y el Oeste es el correspondiente a los equinoccios de primavera y de otoño.

La gráfica que aparece a continuación es una carta cilíndrica o ventana solar genérica. En ella, las curvas que recorren el dibujo formando campanas representan las trayectorias solares según los meses, siendo la curva superior la correspondiente al solsticio de verano, la inferior al solsticio de invierno, y las intermedias las parejas de meses entre estas fechas. Las curvas que cortan estas trayectorias representan las horas del día, siendo la vertical del centro la del mediodía solar, hacia la derecha las horas de la mañana, de una en una, y hacia la izquierda las de la tarde. Una vez ubicado el momento del año y del día en la gráfica, la escala del eje de abscisas proporciona el acimut y la escala del eje de ordenadas la altura solar¹.

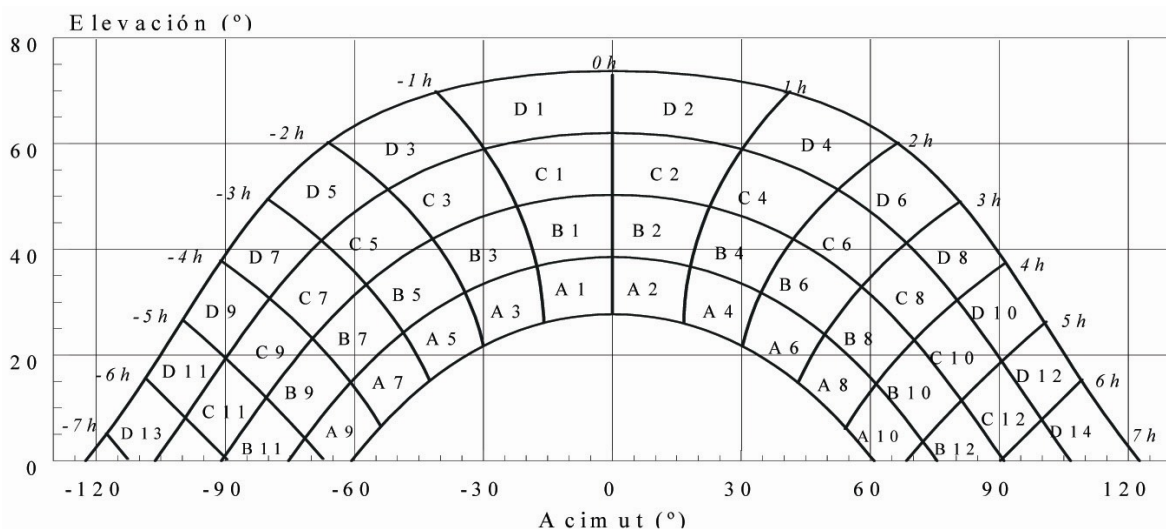


Fig. 4.4- Ventana solar [Código Técnico de la Edificación]

El sol en invierno está más bajo y puede entrar al interior de la casa calentándola. En verano, al estar muy alto no entra. Estos gráficos sólo son válidos para el hemisferio norte, ya que en el hemisferio sur la zona calentada por el sol es la norte.

En invierno el recorrido del sol es más corto por lo que apenas tiene incidencia en las caras Este y Oeste. Por el contrario, en verano el sol sale por el Noroeste y se pone por el Suroeste, por lo que en las paredes Este y Oeste incide perpendicularmente, calentando excesivamente el interior si hay algún hueco².

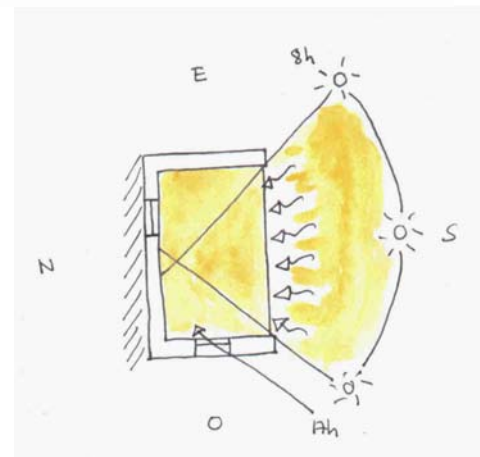


Fig. 4.5- Recorrido del sol en invierno [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

¹ CONFER – F. Javier Neila González. Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible. Madrid. Editorial Munilla-Lería. Marzo 2004. 443 p. ISBN-84-89150-64-8

² CONFER – Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.

CAPÍTULO 4 – LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA

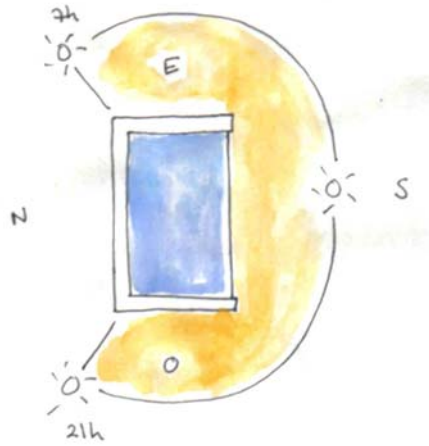


Fig. 4.6- Incidencia del sol en verano sin ventana al Oeste [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

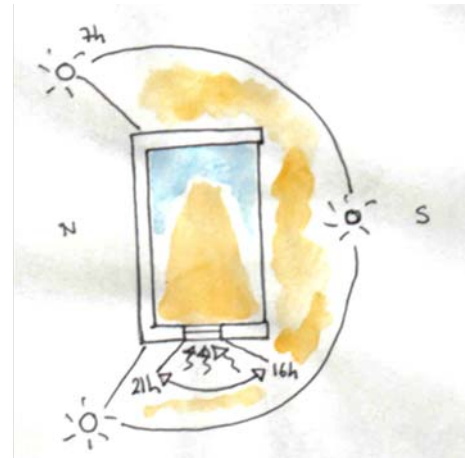


Fig. 4.7- Incidencia del sol en verano con ventana al Oeste [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

La radiación solar no tiene las mismas cualidades por la mañana, al mediodía o por la tarde, ni en verano o en invierno, ni en un día despejado o nublado. Las variaciones son muy diversas y su combinación llega a ser incontrolable; por esto sería absurdo pensar en el diseño de espacios idóneos para cada una de las posibles combinaciones, sino que debemos hacerlo de forma que sean capaces de adaptarse con facilidad a la variabilidad lógica de los fenómenos energéticos¹.

La intensidad de la radiación varía en función del espesor de la capa de aire atravesada. Geométricamente se observa que para una altura solar de 30°, la radiación debe atravesar una masa de aire de espesor igual a 2 veces el espesor de la atmósfera. Para alturas de 20° y 15°, la radiación debe atravesar el equivalente a 3 y 4 veces respectivamente este espesor².

Es importante que haya grandes árboles de hoja caduca situados al Este y Oeste de la vivienda para impedir que entre el calor de las primeras horas de la mañana y de las últimas horas de la tarde. También se pueden utilizar árboles de hoja perenne como protección contra el viento en los lados de los que sople con mayor fuerza el viento.

En la construcción actual pocas veces se medita o repara en estos aspectos, pero este simple conocimiento es uno de los mayores pilares de la arquitectura bioclimática.

¹ Rafael Serra. Arquitectura y climas. 2ª edición. Barcelona. Editorial Gustavo Gili, S.A. año 2000. 94p. ISBN: 84-252-1767-9

² CONFER - José Antonio González González, op. cit.



4.2.8 Fundamentos de la energía solar pasiva

Los factores que determinan este tipo de construcción son¹:

- aislamiento térmico perimetral
- orientación solar
- ubicación de las ventanas
- masa térmica
- beneficio solar directo a través de cristaleras orientadas al sur

1.- Aislamiento térmico perimetral

Cuanto mejor sea el aislamiento de los muros, tejado, cimientos, suelo, puertas y ventanas, menor será la fuga de calor del interior de la casa.

2.- Orientación solar

Idealmente, una casa debería estar orientada hacia el sur verdadero, no al sur magnético, pero una casa que esté a 15° al Este o al Oeste del sur verdadero aún puede recibir el 90% del sol disponible².

3.- Ubicación de las ventanas

El objetivo es conseguir el máximo de calor y aumento de luminosidad en los meses de invierno, un mínimo aumento de calor en los meses de verano, y una buena ventilación y unas buenas vistas. En una casa correctamente orientada, las ventanas que dan al sur permiten que el sol entre en la casa durante el invierno y, por la diferencia de la trayectoria solar, en el verano habrá menos luz solar directa durante la estación cálida. Las ventanas orientadas al norte no tendrán influencia directa de sol ni en invierno ni en verano. Las ventanas orientadas al Este reciben el sol por las mañanas en los meses de verano, lo cual es poco deseable. Las orientadas al Oeste tienen el sol por la tarde, lo cual es poco deseable en los meses de verano.

Cristaleras orientadas al sur

En diseños solares, las cristaleras orientadas al sur son el principal elemento generador de calor. Cuanto mayor sea la superficie de cristal orientada al sur, más ganancia de calor habrá. Cuanto más cristal, sin embargo, menos aislamiento, y la capacidad de la casa para conservar el calor también se verá reducida. De esta forma se incrementa la cantidad de calor perdido por la noche y en las horas en las que no hay ganancia solar, y aumenta la cantidad de calor que entra durante el verano³.

En climas fríos, con bajos niveles de sol invernal, es mejor tener una cantidad mínima de superficie acristalada orientada al sur, con tanto aislamiento como sea posible en los muros para poder confiar más en la retención de calor de los muros que en la acumulación de calor.

¹ CONFER - Athena Swentzell, et. alt., op. cit.

² CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

³ CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.



CAPÍTULO 4 – LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA

Por otro lado, en climas fríos con una gran cantidad de sol disponible, es más efectivo incrementar la cantidad de cristaleras orientadas al sur, y confiar más en grandes cantidades de calor acumulado que en un alto aislamiento.

4.- Masa térmica

La masa térmica en el interior de un edificio puede almacenar calor o frío y después soltarlo lentamente al aire de alrededor.

La masa térmica es necesaria para prevenir el recalentamiento diurno de la estructura y para estabilizar su temperatura ambiente por las noches y períodos de tiempo nublado. Cuanta más masa haya, más estable será la temperatura interior. Además, cuanto más directo incida el sol en la masa térmica, mayor será la ganancia de calor.

Los pavimentos pueden ser un buen elemento de masa térmica. El hormigón, la cerámica o incluso la piedra funcionan especialmente bien. El aislamiento bajo éste funciona bien, ayudando a devolver la ganancia de calor al interior del edificio con mayor rapidez¹.

5.- Cristaleras orientadas al sur

Los aleros solares y las persianas son elementos que pueden utilizarse para dar sombra a las ventanas orientadas al sur durante el verano, y permitir que entre la luz del sol cuando éste está bajo durante el invierno. Generalmente, en los climas más fríos, un alero de estas características debería ser más estrecho para permitir que el sol entre a principios de otoño y avanzada la primavera, mientras que, en climas más cálidos, el alero puede extenderse más hacia el exterior, y así eliminar la ganancia solar al principio de la primavera y retrasar su entrada hasta avanzado el otoño². Los aleros portátiles o móviles y las persianas permiten un mayor control y flexibilidad que los aleros permanentes.

El ángulo de incidencia del vector radiación solar sobre una superficie horizontal, como puede ser el pavimento de una vivienda, varía a lo largo de todo el año, sea cual sea la latitud o la longitud de la construcción en cuestión. Los valores extremos se producen coincidiendo con los solsticios de verano y de invierno. Estos son los momentos en los que el vector radiación solar incide con el mayor ángulo posible sobre el plano ecuatorial, en concreto con $+23^{\circ}30'$ y $-23^{\circ}30'$.

El valor del ángulo de incidencia con respecto a la vertical en un punto geográfico lo podemos calcular restándole al valor de la latitud correspondiente a la zona, el valor de la declinación solar en ese momento. De este modo, en cualquier zona del planeta que esté en una latitud de $23^{\circ}30'$ Norte, en el solsticio de verano tendrán el sol en la vertical ($23,5^{\circ}-23,5^{\circ}=0^{\circ}$).

¹ CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

² CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

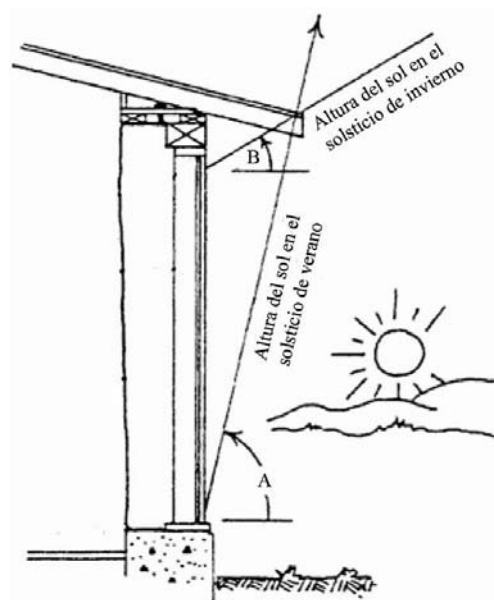


Fig. 4.8- Valores límite de los ángulos de incidencia solar (solsticio de verano y solsticio de invierno) [Athena Swentzell et. al., op. cit.]



CAPÍTULO 4 – LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA

Galicia se encuentra ubicada entre los paralelos 42°Norte y 44°Norte. Si hacemos los cálculos para una zona que esté situada a 43°Norte, resultará que el día del solsticio de verano, el ángulo de incidencia del vector radiación solar con respecto a la vertical será de 19°30' ($43-23.5=19.5$). De igual modo, en el solsticio de invierno la inclinación con respecto a la vertical será de 66°30' [$43-(-23.5)=66.5$]. Estos valores significan que en el primer caso y al mediodía solar, el sol formará con la horizontal un ángulo de 70°30' y en el segundo caso un ángulo de 23°30'. Con estos valores se puede diseñar un alero que permita controlar la profundidad a la que el sol pueda incidir en el interior de la vivienda.

Son muchos los factores a tener en cuenta para el diseño de una buena construcción, energéticamente eficiente y en consonancia con criterios bioclimáticos. Lo primero es analizar las necesidades de los futuros usuarios de la construcción para diseñar los espacios arquitectónicos. A partir de ahí es necesario estudiar las características del emplazamiento para darle forma al espacio anteriormente mencionado. Esta serie de factores relacionados todos ellos entre sí hace que, como dice el arquitecto José Antonio Hernando Ezquerro, *“en principio, cada construcción funciona correctamente en el lugar para el que ha sido estudiada. Un diseño de vivienda puede funcionar perfectamente bien en un lugar y absolutamente mal si se le cambia la orientación o la ubicación”*. Además, aquello que conviene en un clima, puede no convenir en otro distinto o incluso parecido¹.

4.2.9 Zonificación térmica y espacios tampón

La compartimentación de los espacios en zonas diferentes permite crear espacios con características térmicas diferentes adaptados a su utilización específica. También se pueden crear espacios protectores o espacios tampón en la zona norte del edificio para repartir y conservar mejor el calor.

El principio de compartimentación, también llamado zonificación, permite adaptar el tipo de ambiente térmico a la utilización propia del espacio; una estancia poco utilizada o una habitación estarán menos calefactadas que una sala o un baño². Este principio puede complementarse con la adición de espacios tampón protectores no calefactados, como trasteros, garajes, etc.

4.2.10 Termocirculación

Ésta es una forma de distribución del calor a partir del aumento de la temperatura del aire ambiente causada por el soleamiento. Las masas de aire se elevan de forma natural en el edificio, estableciéndose una circulación de aire entre las zonas expuestas a la radiación y las zonas no expuestas.

En período nublado o nocturno, a fin de evitar la circulación inversa que causaría el enfriamiento del edificio, los movimientos de aire deberían ser impedidos mediante algún sistema tal como tabiques móviles, puertas, etc. El ocupante se convierte en parte integrante del funcionamiento energético generando termocirculación, evitando recalentamientos y provocando una mayor uniformidad de las temperaturas interiores³.

¹ CONFER - José Antonio González González. Arquitectura Bioclimática. Colegio de Arquitectos de Galicia, Diciembre de 1997. 109 p. ISBN: 84-85665-28-7

² CONFER - José Antonio González González, op. cit.

³ CONFER - José Antonio González González, op. cit.



4.2.11 Las galerías

Las galerías ofrecen un espacio tampón que favorece la captación de la energía solar. Esta radiación se transforma en calor que queda retenido en este espacio, lo que se conoce como efecto invernadero.

Las galerías funcionan como espacios habitables y en ellas distinguimos 3 elementos fundamentales: la superficie vidriada de captación de la radiación, la capacidad de almacenamiento, y el elemento de separación entre la galería y el resto del edificio.

En invierno, la radiación solar es aprovechada para calentar el aire de la galería y calentar el aire que entrará en el edificio. En verano, protectores solares exteriores y una ventilación continua permiten limitar el recalentamiento. Las galerías no pueden ser consideradas plenamente como espacios habitables, sino más bien como reservas de espacio. La orientación preferente de una galería es al Sur, y su volumetría ideal es la de un cuerpo estrecho y alargado¹.

4.2.12 Muros trombe

El muro trombe tiene un funcionamiento similar al que puede tener una galería convencional, aunque con algunas diferencias. Se debe orientar al sur y consta de una superficie exterior acristalada, una cámara de aire de unos 50 mm y una pared interior de unos 300 mm de espesor de un material suficientemente denso como para almacenar el calor.

La cara exterior del muro interior es preferible que tenga un color oscuro para captar mejor la radiación solar. De este modo, el aire que se encuentra en la cámara comenzará a elevar su temperatura, elevando consigo la de la pared interior. Además, como aparece en la figura, se deben practicar varias perforaciones en la pared interior, unas en la parte inferior y otras en la superior. Esto asegura una circulación del aire que entrará frío en la cámara y retornará caliente a la habitación por la parte superior. Si no existiesen estas perforaciones, el aire se calentaría demasiado y su energía se perdería hacia el exterior a través del vidrio². Existen casos en los que se colocan ventiladores en estas perforaciones para forzar esta circulación del aire³. Es importante, como aparece en el gráfico, dotar el sistema con una persiana enrollable para proveer sombra en el verano y evitar las pérdidas de calor durante los períodos nocturnos en invierno.

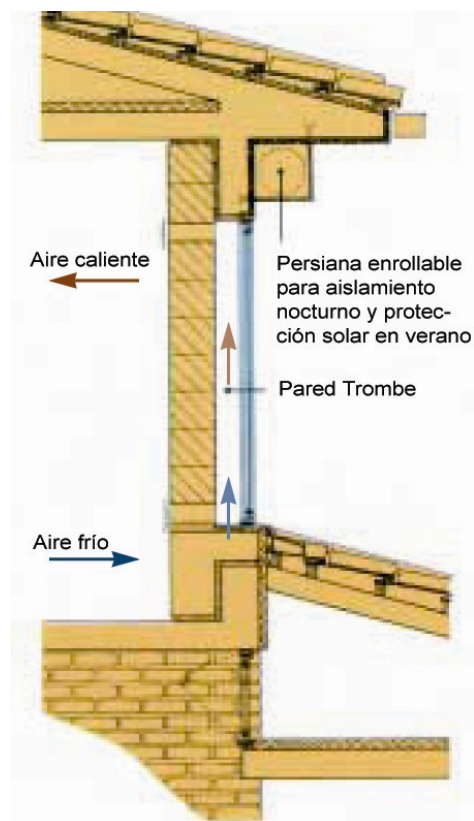


Fig. 4.9- Esquema de un muro trombe [M. Villarrubia y L. Jutglar, op. cit.

¹ CONFER - José Antonio González González, op. cit.

² CONFER - F. Javier Neila González, op. cit.

³ CONFER - M. Villarrubia y L. Jutglar. Arquitectura solar pasiva. Ahorro energético en calefacción. [On line]. Facultad de física. Universidad de Barcelona, Febrero de 1999. Disponible en web: <<http://www.energuia.com>>

CAPÍTULO 4 – LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA

En el año 1999 se realizó un programa experimental que consistía en realizar el seguimiento de una vivienda unifamiliar, en la zona de Oporto (Portugal), térmicamente optimizada, para determinar el grado de eficiencia energética de la misma. La vivienda fue diseñada por Carlos Araujo y Santiago Boissel y ésta, entre otros muchos elementos, contaba con un sistema de muros trombe como el del gráfico anterior, y los resultados del estudio fueron muy favorables. Haciendo una comparativa de esta casa con una convencional de las mismas características y ubicación, se detectó un ahorro de un 73% de energía destinada a calefacción¹. Las paredes trombe demostraron ser muy efectivas.

4.3 Aplicación a la construcción con balas de paja

Por un lado se han mencionado las propiedades de la paja embalada como material de construcción dentro de la arquitectura bioclimática y por otro lado se ha hablado de criterios generales encaminados a conseguir viviendas energéticamente eficientes. El material que estamos estudiando, la paja embalada, juega un papel fundamental en la eficiencia energética. Sus características lo hacen recomendable para colocar en zonas en las que se quiera limitar las pérdidas caloríficas, especialmente en las fachadas orientadas al norte (en el hemisferio norte). En estas fachadas se deben evitar o limitar al máximo las superficies acristaladas, ya que representan una zona de poca ganancia pero sí de gran pérdida calorífica. Por otro lado, en la zona sur se pueden utilizar superficies acristaladas mayores, o incluso cerramientos con otras prestaciones tales como la acumulación de calor. Un ejemplo de esto sería un muro trombe como el que aparece en la siguiente imagen.



Fig. 4.10- Muro trombe en una pared con balas de paja [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

La superficie acristalada está realizada utilizando el acristalamiento de ventanas desechadas, mientras que el muro interior es de mampostería con piedras de color oscuro para captar la mayor cantidad de radiación solar. Sería aconsejable dotarlo de un elemento de protección solar por la parte externa que se

¹ CONFER – M. Villarrubia y L. Jutglar, op. cit.



CAPÍTULO 4 – LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA CONSTRUIDA CON BALAS DE PAJA

pueda retirar en invierno y colocar en verano, para que los rayos del sol no incidan en la cámara de aire ni en la pared interior.

Conseguir las superficies de iluminación adecuadas supone tener que analizar las opciones posibles según la modulación de fachada y los huecos que permita el sistema constructivo. Si las paredes van a soportar más carga que la de su propio peso, entonces los huecos no deben ser demasiado grandes. Esto podría producir deformaciones de la estructura que exista en coronación, o incluso una concentración de carga en ciertos puntos de la pared. En el caso de muros de carga, es recomendable que la distribución de los huecos sea lo más uniforme posible. Si la construcción cuenta con una estructura auxiliar, entonces existe mayor libertad para el tamaño y la distribución de los huecos. Algo similar nos encontramos cuando comparamos los gruesos muros de mampostería de las antiguas construcciones con las estructuras porticadas que emplean cerramientos multicapa de fábrica de ladrillo. Antiguamente, el sistema constructivo no permitía realizar grandes huecos, y éstos solían distribuirse adecuadamente a lo largo de las paredes. Hoy en día existe libertad para crear estas grandes superficies de iluminación.

El aislamiento térmico es uno de los factores que mejor representan la construcción con balas de paja. Hay que evitar que el calor que se genera dentro de la vivienda se pierda por las paredes, y las paredes por las que más calor se puede perder son aquellas en las que el sol incide poco o no incide.

Las buenas propiedades de las paredes de balas de paja, con o sin recubrimiento, para actuar como aislante o absorbente acústico están demostradas. Sabiendo esto, si la vivienda se va a construir en una zona ruidosa, aunque dentro de lo aceptable, se sabe que el ruido no va a llegar a molestar a las personas que se encuentren en su interior.

La protección frente a la lluvia es muy importante en las paredes de balas de paja. Las zonas en las que el agua de lluvia incida con mayor frecuencia deben recibir una especial atención, bien utilizando aleros más grandes o aumentando el número de capas y el espesor del recubrimiento.

La combinación de materiales, de técnicas y de elementos constructivos es lo que hace que, en una construcción, se rentabilicen al máximo las propiedades de cada uno de dichos factores. Este es el motivo de que sea fundamental conocer las características de las balas de paja, las del espacio arquitectónico y las del entorno para determinar la forma en la que se optimizan las propiedades de la paja embalada.



Capítulo 5

PROYECTOS DESTINADOS
AL DESARROLLO DE ZONAS
NECESITADAS



5.1 Introducción

Debido a las características que poseen las construcciones con balas de paja (que se detallarán en próximos capítulos) y a las propias del material en sí, este tipo de construcción se presenta como apto para ser utilizado en zonas con escasos recursos económicos con el fin de construir viviendas modernas. En nuestro planeta existen muchas zonas con escaso desarrollo económico, escasez de materiales de construcción, incluso con climatologías especialmente frías y con una población considerable con necesidad de vivienda. En estos casos, las construcciones con balas de paja son una buena solución y así lo demuestran los proyectos realizados en este sentido.

A continuación vamos a mencionar alguno de estos, aunque seguramente existen muchos otros similares, y posiblemente no serán los últimos.

5.2 El Proyecto Navajo

La “Navajo Nation” (localizada en territorio de Arizona, Nuevo México y UTA) es la mayor reserva India Americana en los Estados Unidos. Con una población de 200.000 personas repartida en unos 70.000 km², la comunidad de Navajo tiene continuamente necesidad de viviendas adecuadas. Esta necesidad de viviendas es complicada por la falta de electricidad en estas zonas remotas, decrecientes suministros de leña y crecientes costes de materiales de construcción. Los jefes de la comunidad de Navajo querían casas que empujaran la economía local, que usaran materiales y mano de obra local, y mantuviera la integridad de su cultura.

En 1991, la “Navajo Nation” le pidió ayuda al *Department Of Energy* (DOE) para construir casas más eficientes y, a la vez, económicas. Ante esta propuesta, el DOE les proporcionó fondos destinados a ayuda técnica para estudiar diseños de casas y sugerir alternativas, mientras que la “Navajo Nation” proporcionó fondos para la construcción de una casa piloto¹. En Diciembre de 1992 se formó un equipo para discutir la construcción de las casas, evaluar las opciones de diseño, identificar las necesidades de los habitantes y analizar las opiniones de la población. Los miembros de este equipo fueron elegidos por su experiencia en energía, economía, materiales indígenas, diseños de arquitectura solar pasiva y conocimiento de la comunidad de Navajo y sus tradiciones. El equipo se estableció en Gallup (Nuevo México) y se centro en los criterios de diseño para la casa prototipo:

- Eficiencia energética
- Economía
- Uso de materiales locales
- Uso de mano de obra local
- Compatibilidad cultural
- Simplicidad de diseño, capacidad de adaptación y confort

¹ CONFER - U.S. Department of Energy. House of Straw – Straw Bale Construction Comes of Age [on line]. Abril de 1995. [Consulta: 8 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.eren.doe.gov/buildings/documents/strawbale.html>>



CAPÍTULO 5 – PROYECTOS DESTINADOS AL DESARROLLO DE ZONAS NECESITADAS

El diseño final fue una combinación del “estilo Nebraska” de muros de balas de paja y muros de adobe con orientación solar. Esta combinación tiene muchos beneficios. Las balas de paja y el adobe son baratos, disponibles en la zona y pueden ser manejados por personas sin experiencia con un mínimo entrenamiento. Los muros de balas de paja tienen unas propiedades enormes como aislante térmico, y el muro de adobes



Fig. 5.1- Alzado Sur de la Casa piloto del Proyecto Navajo [House of Straw – Straw Bale Construction Comes of Age – U.S. Department of Energy – 1995]

orientado al sol había sido utilizado durante siglos por los nativos Americanos. Debido a los 60 centímetros de espesor del muro de balas de paja, la estructura resultante tenía un espacio útil de unos 90 m².

La construcción de la casa piloto empezó en Julio de 1993 cerca de Ganado (Arizona) y se terminó en Diciembre de 1994. La casa cumplía los criterios de diseño establecidos previamente.

5.3 Grupo de desarrollo “Red Feather”

Red Feather dirige la mirada pública hacia la pobreza y los problemas graves de vivienda que han padecido las reservas indias americanas durante generaciones. Consigue fondos y organiza voluntarios para construir hogares en estas reservas y anima a esta población a crear viviendas duraderas y basadas en la sostenibilidad.

El trabajo de Red Feather se basa en el espíritu de la gente que ayuda a otra gente. Después de haber escuchado que varios ancianos habían muerto a causa del extremo frío en una reserva india, Rober Young fundó en 1994 el “Red Feather Development Group”. Robert Young ha dirigido el grupo en la exitosa realización de 40 proyectos de construcción en reservas indias Americanas en el Oeste de los Estados Unidos. Por medio de Red Feather, y mientras construía casas en el campo, ha conseguido que los Americanos sean conscientes de las duras condiciones en las reservas indias¹. Durante la década pasada, los voluntarios de Red Feather y miembros de tribus han construido casas e industrias y han arreglado casas existentes.

La situación actual es una tragedia nacional y una llamada a la acción. De los 2 millones de miembros de tribus que viven en reservas indias Americanas, 333.000 no tienen un lugar en el que vivir, y muchos otros viven en pésimas condiciones. Los nativos americanos son más propicios a contraer tuberculosis que los no nativos. La diabetes o la neumonía son también muy comunes en estos lugares.

¹ CONFER - Nathaniel Corum. Building a Straw Bale House: The Red Feather Construction Handbook. Primera edición. New York: Princeton Architectural Press, 2005. 181p. ISBN 1-56898-514-2

CAPÍTULO 5 – PROYECTOS DESTINADOS AL DESARROLLO DE ZONAS NECESITADAS

Red Feather creía que las familias nativas debían tener el mando en la mejora de sus comunidades y estos estaban animados a participar en el proceso. Hay miembros de las comunidades que se unen a la organización y a los voluntarios durante la construcción.

El objetivo del proyecto de desarrollo de Red Feather es enseñar técnicas de construcción con balas de paja para así crear a largo plazo una comunidad autosuficiente. Los talleres y los seminarios enseñan

diferentes métodos de construcción y estos son los más prácticos, actuales y están basados en criterios de sostenibilidad.

La construcción con balas de paja es una elección lógica en las reservas del Oeste de los EEUU en donde hay comunidades muy pobres, tienen inviernos muy fríos y tienen una abundante producción de trigo (por lo tanto de paja).

Red Feather ha desarrollado un número importante de proyectos de construcción en colaboración con las comunidades de tribus y los gobiernos locales. En parte, como consecuencia de esto, muchos bancos importantes, incluidos Fannie Mae y Washington Mutual, están preparados para invertir en las tribus.

Red Feather está colaborando con varias entidades, como universidades e institutos, para crear proyectos de construcciones con balas de paja, económicas y basadas en criterios de sostenibilidad, en las reservas indias del Oeste de los EEUU. Su máximo objetivo es crear comunidades autosuficientes.

Las *Current native-based community Development Corporations* (CDCs) tienen un papel importante en esta iniciativa. Éstas asesoran a los miembros de las tribus con métodos de diseño de casas, planeamiento de comunidades, dirección de los voluntarios y construcción. Las CDCs ponen a los miembros de las tribus en situación de crear cambios en sus comunidades.



Fig. 5.2- Ejecución de la cimentación de un refugio en una reserva india de EEUU. [Nathaniel Corum, op. cit.]

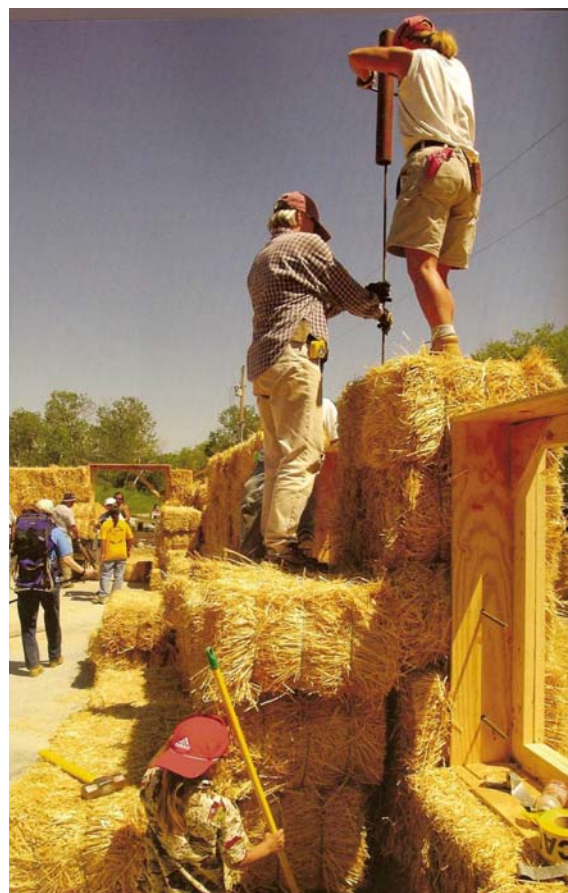


Fig. 5.3- Ejecución de los muros de balas de paja de un refugio en una reserva india de EEUU. [Nathaniel Corum, op. cit.] Llama la atención la ausencia de medidas de seguridad.



CAPÍTULO 5 – PROYECTOS DESTINADOS AL DESARROLLO DE ZONAS NECESITADAS

Red Feather revisa constantemente sus diseños de edificios y los procesos de construcción junto con las comunidades. Los futuros proyectos se beneficiarán de esto porque permite adoptar nuevas tecnologías y técnicas mientras continúan construyendo viviendas adecuadas.

5.4 Desarrollo de las zonas rurales de China

5.4.1 Situación actual

China está teniendo un extraordinario crecimiento económico. No obstante, existen datos que confirman que este rápido crecimiento ha tenido un gran impacto en el mercado mundial de la energía y en el medio ambiente¹. La degradación del medio ambiente está amenazando, entre otras muchas, las comunidades chinas en las que viven 1,3 billones de personas.

Hay tres problemas fundamentales que afectan a los materiales de construcción en las zonas rurales de China²:

1- Los materiales de construcción habituales no son respetuosos con el medio ambiente.

La gran población de China ha creado una gran necesidad de viviendas. Estas nuevas viviendas son casi todas construidas con ladrillo, que necesita grandes cantidades de energía para ser cocido, por lo que origina una gran contaminación. El ladrillo es ampliamente utilizado en las zonas rurales de China.

2- Las viviendas comunes de las zonas rurales no son energéticamente eficientes.

Estas casas están a menudo construidas con barro y piedra y ofrecen escasa protección contra el extremo frío (incluso -40°C), necesitando quemar grandes cantidades de carbón para obtener calor y generando gran contaminación. Cerca del 90% de la energía que consumen en las viviendas es usada para calentar³. Los costes de calefacción para los habitantes de estas casas deficientemente construidas son importantes, impidiendo a esta gente pobre mejorar sus vidas y superar la pobreza. Una vivienda de 80 m² necesita quemar alrededor de 5 toneladas de carbón cada invierno para mantener todas las habitaciones calientes. Sin embargo, los pobres granjeros no pueden comprar 5 toneladas de carbón y compran una tonelada para mantener las habitaciones calientes durante la noche. Esto causa problemas de salud sobre todo en los niños y los ancianos.

CONSUMO ANUAL DE CARBÓN (millones de ton)	
China	1.310.000
EEUU	1.060
India	339
Rusia	298
Alemania	265

Tabla 5.1- Straw Bale Construction in China – Linh Vuong – University of Puget Sound - 2004

¹ CONFER - Linh Vuong. Straw Bale Construction in China: a comparison of obstacles between Northern and Southern rural areas for the use of Straw Bale Construction as an energy efficient building alternative [on line]. University of Puget Sound, Washington, julio 2004. [Consulta: 26 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.stawbalebuilding.ca>>

² CONFER - Linda Zhu. Straw Bale Ecological Housing Program [on line]. ADRA China, 2005. [Consulta: 26 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.stawbalebuilding.ca>>

³ CONFER - Linh Vuong, op. cit.



3- Las viviendas habituales en las zonas rurales de China son poco seguras ante los terremotos.

Las casas de ladrillo son poco seguras durante los terremotos porque los muros son muy duros y no están bien unidos. El ladrillo tiene poca capacidad para absorber la energía de un sismo y se rompe con facilidad. Muchas escuelas de ladrillo se destruyeron en el año 2003 en Chifeng (Mongolia Interior), después de un terremoto de 5,9 grados Richter.

5.4.2 Técnicas alternativas

En el año 1998, el *Adventist Development and Relief Agency (ADRA) China Office* introdujo en China la tecnología de la construcción con balas de paja para dar solución a estos problemas. Los muros de balas de paja proporcionan un aislamiento térmico mucho mayor que los de ladrillo. Los datos son muy variables pero, en estas condiciones, se puede decir que una casa de balas de paja tiene un 50% más de eficiencia energética que una de ladrillo.

El *Straw Bale Ecological Building Program* fue diseñado para enseñar a la gente a construir estructuras utilizando balas de paja. Trabajando con *One World Design Architecture* en EEUU y con la experiencia de Kelly Lerner, unos 400 profesionales locales fueron entrenados en este programa. El proyecto construyó unas 600 casas y 3 colegios en 59 comunidades desde 1998 hasta 2004. Un tipo de construcción con fardos de paja fue desarrollado basándose en materiales de construcción, técnicas de construcción y diseños de la zona.

Al principio se encontraron con tres dificultades:

- 1- Falta de aceptación de este tipo de construcción.
- 2- Preferencia por las casas de ladrillo.
- 3- Escasa preocupación medio ambiental por parte de la administración.

Aunque la construcción con balas de paja tiene varias técnicas constructivas, el proyecto eligió la opción no portante. Un sistema de soportes de ladrillo y vigas de hormigón conforman la estructura y las balas son colocadas de relleno entre los soportes. Debido a que las balas de paja no soportaban ninguna carga y a que las columnas de ladrillo eran bien conocidas por las gentes, los usuarios tenían confianza en la seguridad de sus casas.

Un proyecto de introducción de tecnología, como era este,



Fig. 5.4- Muro de balas de paja y soportes de ladrillo en la Mongolia Interior
[Linh Vuong, op. cit.]



CAPÍTULO 5 – PROYECTOS DESTINADOS AL DESARROLLO DE ZONAS NECESITADAS

necesitaba de cierto tiempo. Se estimaba que harían falta unos 10 años para introducir por completo la construcción con balas de paja en China¹.

Previsión a largo plazo para el proceso de adaptación al nuevo sistema constructivo:

1998-2000: Introducción de la nueva tecnología

Desarrollar la capacidad técnica local

Desarrollar diseños apropiados desde un punto de vista cultural

Adaptar la tecnología a los sistemas de construcción existentes

2001-2003: Demostraciones a gran escala y esparcir las viviendas

Mejorar la técnica (aislamiento térmico, enfoscados,...)

Construir varios prototipos de viviendas

2004: Demostración de construcciones públicas como escuelas

Proporcionar un entrenamiento en técnicas avanzadas para arquitectos, ingenieros y funcionarios.

Difusión entre el sector privado de la construcción

2005-2006: Continuar con las demostraciones de construcciones públicas

Estudio de viabilidad

Formación de una asociación local de construcción con balas de paja

Facilitación del desarrollo de una normativa y una puesta en práctica

2007 adelante: Establecimiento de una normativa

Estudio de la tecnología de la construcción local con balas de paja

¹ Linda Zhu, op. cit.



Capítulo 6

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA CONSTRUCCIÓN CON BALAS DE PAJA



6.1 Ventajas de la construcción con balas de paja

6.1.1 Introducción

La paja es un producto que crece en un período corto de tiempo, es biodegradable y con su uso se pueden aliviar múltiples problemas del medio ambiente. Las balas de paja son fáciles de modificar, flexibles para ser usadas en diferentes formas, sólidas y duraderas. No requieren herramientas caras ni complicadas y tampoco personal especializado y son fáciles de conseguir en cualquier parte del mundo. Cuando la paja es combinada con otros materiales de similares características, se consiguen edificios asequibles en todos los aspectos¹.

6.1.2 Belleza y comodidad

Las paredes construidas con balas de paja tienen una especial personalidad y belleza. Además, su alto grado de aislamiento térmico propicia una sensación de confort que no tienen las delgadas paredes levantadas con materiales modernos. Las paredes de fardos de paja son similares, en apariencia, a los viejos y gruesos muros de piedra y barro con los que fueron construidas antiguamente tantas casas².

6.1.3 Facilidad de construcción

En muchas partes del mundo se ha demostrado que el método básico de construcción con balas de paja se puede aprender en un taller en un par de días. En la actualidad, en España, son muchos los talleres organizados con este fin. Una de las bellezas de este sistema es que todo el mundo puede participar en este tipo de construcción y las reuniones de gente para ayudarse unos a otros a construir suelen generar un gran entusiasmo. Levantar paredes en grupo facilita proyectos basados en la comunidad que, de otra manera, podrían no llevarse a cabo³. Esto es aplicable en casos de pequeñas construcciones de escasa importancia, para las que no sean necesarios grandes conocimientos técnicos. Cuando se trata de una edificación en la que el aspecto estructural es importante, éstas deben estar dirigidas y construidas por profesionales.

6.1.4 Beneficios medioambientales

La construcción con balas de paja puede ofrecer beneficios en aquellas zonas en las que la paja es un producto de deshecho. Las cortinas de humo que se generan por la quema de grandes cantidades de paja permanecen en el aire durante semanas y producen grandísimas cantidades de monóxido de carbono. En 1988 en Willamette, Oregón (EEUU), tuvo lugar un accidente en la autopista, debido a la reducida visibilidad por culpa del humo de la quema en los campos, que causó 7 muertos y 37 heridos⁴.

La construcción con fardos de paja podría ser útil para controlar el deterioro atmosférico y el calentamiento del globo. La paja de deshecho podría ser embalada y usada en la construcción y de esta forma se produciría un descenso significativo en la devastación de áreas de madera destinada a construcción.

¹ CONFER - Athena Swentzell et al. Traducción al Español de: The Straw Bale House: Designing and Building With a Resource-Efficient Material. Chelsea Green Publishing Company, 1994. 300 p. ISBN 0930031717

² CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.

³ CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.

⁴ CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.





6.1.5 Sostenibilidad

En contraste con la madera usada para construir, la paja puede crecer en menos de un año. Es un recurso que nos proporciona la naturaleza periódicamente y debemos ser capaces de ver las posibilidades que éste tiene para la construcción¹.

Aunque su composición es muy similar a la de la madera, su constitución es muy diferente. Los árboles tardan muchos años en producir madera apta para el uso en construcción pero, a cambio, nos proporcionan un material sólido, con una constitución que nos facilita esta aplicación. Por otro lado, la paja no nos permite este uso tan fácil directamente, pero para eso se inventan procesos como el embalado que consiste en el atado de las fibras formando un denso bloque.

6.1.6 Economía

El coste de una construcción puede variar enormemente en función de muchos factores. Además, si el tipo de construcción lo requiere, en este se incluyen los costes de proyecto, licencias, estudios, etc. Si la construcción no necesita todo lo anterior, debido a su escasa complejidad, y además va a ser construida por los propietarios, el coste puede disminuir de una forma considerable.

Dejando a un lado estas consideraciones, el precio del material en sí se puede considerar económico, teniendo en cuenta sus prestaciones. Su precio es variable dependiendo de la zona; en el norte de España un precio representativo puede ser el de 2€ por unidad de bala de dos cuerdas. En el precio también influye el transporte. Hay zonas en las que se conforman mejores balas que en otras, y si no es necesario el transporte, nos resultará más económico.

6.2 Inconvenientes

6.2.1 Presencia de roedores

En principio no existe mayor riesgo de presencia de ratones en una vivienda de balas de paja que en una convencional. La paja es el tallo de una planta a la que se le ha sacado el fruto, y por tanto no debería contener alimento que pueda atraer a los ratones. Una vez que el muro se ha recubierto, éste es similar a cualquier otro tipo de muro a la vista de un ratón. Lo que les interesa a los ratones sería vivir en huecos entre los fardos y el suelo, pero sería el hueco y no la paja lo que les interesa. Para prevenir es conveniente mantener las paredes, y sobre todo las partes bajas de éstas, en buen estado de conservación².

6.2.2 Presencia de insectos

Como se ha dicho anteriormente, el recubrimiento de las paredes actúa como una barrera protectora frente a cualquier agente que quiera penetrar en la pared. De todos modos, es recomendable aplicarles a las

¹ CONFER – Barbara Johnes. Information Guide to Straw Bale Building [on line]. Amazon Nails, 2001. [Consulta: 27 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalefutures.org.uk>>

² CONFER – Red de construcción con balas de paja. Preguntas comunes y respuestas [on line]. [Consulta 28 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.casasdepaja.com>>





CAPÍTULO 6 – VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA CONSTRUCCIÓN CON BALAS DE PAJA

balas una solución de bórax como precaución frente a cualquier tipo de insecto que pudiera alcanzar el interior de la pared por la razón que sea.

6.2.3 Durabilidad

Puede haber personas que piensen que una vivienda construida con balas de paja es algo muy poco duradero, y pueden tener razón, o no. Es difícil saber cuántos años puede llegar a durar una vivienda construida con balas de paja, pero lo que sí se sabe es que existen algunas que han durado 100 años. Para conseguir que una construcción de este tipo sea duradera es muy importante, al igual que en cualquier otro caso, realizarla correctamente y realizar operaciones de mantenimiento periódicas que la mantengan en buen estado. Si partimos de una construcción defectuosa, está garantizado que la durabilidad será reducida.

6.2.4 Pudrición

De entrada es necesario evitar toda presencia de agua en las balas que conforman una pared. Si se mojan algunas balas una vez colocadas en la pared, puede ser peligroso. Si en una bala penetra el agua hasta su interior le será mucho más difícil secarse que si la mojadura solo afecta a la superficie. En este último caso sería suficiente con dejarla secarse al aire durante un tiempo¹.

6.2.5 Incendios

Este tema se tratará con mayor detalle en el apartado de comportamiento ante el fuego. De entrada hay que decir que la paja embalada como elemento constituyente de un muro con un recubrimiento no es fácilmente combustible. Tanto la escasa presencia de oxígeno en el interior de las balas como la protección que confiere el recubrimiento son factores que limitan enormemente la posibilidad de incendio de estas paredes.

6.2.6 Fijaciones a las paredes

Realizar una fijación mediante tirafondos a la pared de balas de paja no es imposible, pero sí muy difícil. La mejor forma de dar solución a esto es prever la posición en la que se van a colocar los elementos que se quieran fijar para dejar insertados en las balas los elementos (tacos, listones,...) que sean necesarios como soporte para una fijación con un tirafondo.

¹ CONFER – Red de construcción con balas de paja. Breve historia, op. cit.



Capítulo 7

ANÁLISIS ESTRUCTURAL



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

7.1 Consideraciones generales sobre la construcción con balas de paja

Las variaciones en los materiales o en las distintas formas de combinarlos en una pared de balas de paja son muchísimas, aunque existen una serie de aspectos comunes a todas ellas:

Oquedades

Todas las construcciones con balas de paja tienen decenas de oquedades entre las balas de paja o entre las balas y las ventanas o las puertas. Es importante rellenar esos huecos antes de aplicar el recubrimiento definitivo de la pared ya que de no hacerlo se vería comprometido el comportamiento térmico, acústico o incluso ante el fuego. Lo ideal es rellenarlos con una mezcla de paja y mortero del que se vaya a utilizar en el recubrimiento.

Inmovilización

Las balas necesitan ser fijadas durante su apilado por razones de alineación y estabilidad. Una forma de hacerlo puede ser clavando internamente barras o listones de madera. También se pueden emplear listones externos enfrentados y atados uno al otro a modo de guías verticales.

Alejarse del agua

La paja puede llegar a descomponerse según las condiciones de humedad de las que se encuentre. La cimentación de los muros debe mantener las balas elevadas del terreno y la cubierta debe tener un alero que ofrezca suficiente protección frente a la lluvia.

Formas de colocación de las balas

Las formas más comunes de colocar las balas de paja son en *horizontal* y en *vertical*. En alguna ocasión han llegado a colocarse con la mayor dimensión en sentido vertical, pero son casos muy puntuales. La colocación en horizontal es la más común, entre otras razones porque ofrece mayor estabilidad. Esta forma de colocación permite además el curvado de las paredes con mayor facilidad. Por el contrario, las balas colocadas en vertical tienen las ataduras expuestas a la cara interna y externa, dificultando la aplicación de los recubrimientos y haciendo las ataduras más débiles al fuego. Esta forma de colocación se suele utilizar cuando se cuenta con una estructura auxiliar, es decir, las balas de paja no soportan carga.

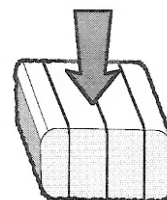


Fig. 7.1- En horizontal

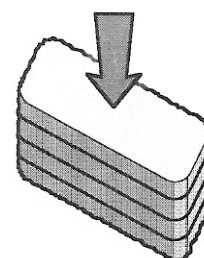


Fig. 7.2- En vertical

Precompresión

La mayor parte de las balas de todo el mundo son bastante compresibles. Una pared de unos 2,40 metros de altura puede asentar del orden de unos 50 mm con su propio peso y con tiempo o por medios mecánicos después del apilado. Si las balas son de paja de arroz, el asiento será bastante inferior. Este



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

fenómeno se debe a la reducción del espacio entre las balas y a la acomodación de las fibras de las propias balas.

La precompresión hace que la pared de balas de paja sea más rígida, mejorando el comportamiento estructural de la pared y proporcionando un mejor soporte al recubrimiento. La energía aplicada para este proceso e incluso la forma de aplicar dicha energía varía según el tipo de construcción que se trate. Una forma, entre tantas otras, para aplicar esta energía es con correas de poliéster de las que se utilizan en el embalaje convencional.

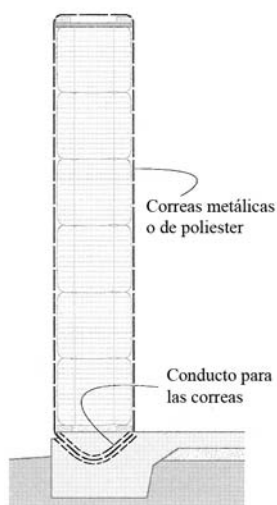


Fig. 7.3- Precompresión de la pared antes de aplicar el recubrimiento [Bruce King con Mark Aschheim, Kevin Donahue, David Mar y Dan Smith, op. cit.]

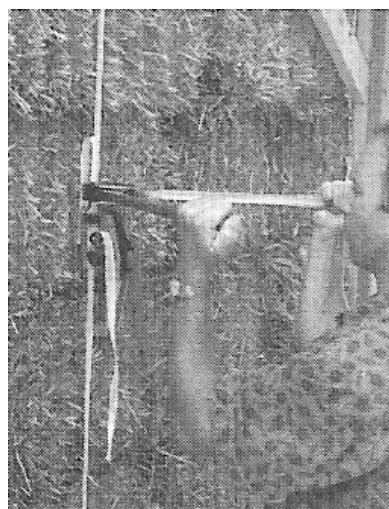


Fig. 7.4- Aplicación de precompresión con correas de poliéster. Foto facilitada por David Eisemberg [Bruce King con Mark Aschheim, Kevin Donahue, David Mar y Dan Smith, op. cit.]



7.2 Características portantes de una bala de paja bajo compresión

7.2.1 Introducción

A mediados de los 80, la *Canada Mortgage and Housing Corporation* fue la primera en patrocinar las pruebas de resistencia de las construcciones con balas de paja. Las paredes, en estas pruebas, tenían argamasa en las juntas entre las balas y yeso en ambas caras.

Pruebas iniciales, llevadas a cabo por Ghailene Bou-Mi, demostraron que las paredes de fardos de tres cuerdas sin enlucido eran fuertes y resistían bien cargas laterales y verticales. La primera parte de su estudio midió la resistencia a compresión de los fardos individuales, llegando a resultados importantes cuando estos eran ensayados en su posición horizontal, apoyados en la cara de mayor superficie (59 cm. x 115 cm.). La prensa hidráulica notó un cambio en la resistencia a los 320 KN de carga. Se consideró que este era el punto de ruptura, aunque no se rompió ninguna de las cuerdas del fardo. El tamaño de la bala había disminuido a la mitad y una vez retirada la carga, éste había recobrado casi por completo su tamaño inicial.

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las balas en posición vertical (en fabrica de ladrillos sería a tabicón) fueron menos impresionantes. Éstos demostraron mucha menos resistencia en esta posición. Por esta razón, esta posición está más indicada para casos de estructura resistente auxiliar o portantes pero con poca carga. En esta posición se obtiene la misma superficie de pared con un número inferior de unidades además de ocupar menos superficie en planta¹.

La carga que se transmita a las balas de paja debe llegar lo más distribuida posible. La paja embalada es un material elástico en una fase inicial de la carga. De este modo, si cargamos una pared de balas de paja con cargas puntuales, el asiento de las mismas será muy distinto de unas zonas a otras. Esta es la razón de que se utilicen estructuras de coronación para el reparto de cargas.

Como la paja embalada es un material elástico, la aplicación de una carga supone un acortamiento de la paja en la dirección de la carga. Uno de los principales problemas estructurales que tiene este material es la necesidad de aplicar una energía de compresión antes de que las paredes entren en carga. Esta es la forma de evitar o limitar la merma de altura de los elementos estructurales, merma que supondría un problema importante para el conjunto de la construcción.

7.2.2 Análisis técnico

7.2.2.1 Introducción al análisis estructural

Existen muchos ensayos realizados sobre balas de paja para estudiar su comportamiento ante cargas de compresión. Los resultados de estos ensayos proporcionan información de lo que les ocurre no sólo a las balas de paja individuales sino también a paredes conformadas con éstas. Actualmente no existe un consenso acerca de la relación entre la resistencia de una bala de paja con recubrimiento y la de un muro de balas con el mismo, aunque claramente existe un número de variables que pueden afectar a la resistencia del muro.

¹ CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

También se han realizado ensayos en paredes de balas de paja pero en un número inferior, ya que son más costosos y requieren un mayor tiempo de ensayo¹.

En este apartado se analizará un estudio existente que se centra en los efectos que produce la compresión en las balas de paja, en particular los conceptos de resistencia y rigidez. El objetivo es establecer las características portantes de una bala de paja con o sin recubrimiento.

Los resultados mostraron que, en líneas generales, existen 4 fases distintas en la respuesta de una bala de paja sin recubrimiento, y se puede apreciar una tendencia lineal para cada una de las fases. A partir de los datos obtenidos también se puede establecer el valor óptimo de precompresión que se debe adoptar para la ejecución de una pared. Un valor de entre el 3% y el 4% sería suficiente para mejorar el comportamiento de la pared de forma significativa².

Gracias a los resultados de los ensayos se puede decir que las balas de paja tienen unas propiedades excelentes bajo cargas cíclicas de baja frecuencia, incluso con una amplitud elevada. Estos mismos resultados indican que las balas de paja, tengan recubrimiento o no, tienen distinta carga de fallo. Sin embargo, a diferencia del comportamiento plástico de otros materiales, como ocurre en el acero después del límite elástico, las balas de paja pueden desarrollar una importante resistencia después de este límite.

Comparadas con las balas sin recubrimiento, las que tienen recubrimiento tienen una mayor resistencia y rigidez. El recubrimiento de cemento no tiene un incremento significativo de resistencia comparado con el del barro, además de que las grietas aparecen en el recubrimiento con mayor facilidad.

7.2.2.2 Descripción del procedimiento de análisis

Para esta investigación se ensayó un grupo de 11 balas de paja. De este grupo, 5 no tenían recubrimiento y de estas 5, 3 fueron ensayadas en el sentido horizontal (a medio pie) y 2 en sentido vertical (a tabicón). Un número de éstas fue ensayado bajo ciclos de carga y descarga. Las otras seis del grupo fueron recubiertas tanto con barro como con cemento.

Para realizar el ensayo de compresión se utilizó la *Universal Testing Machine (UTM)* en el *Construction Laboratory* de la Universidad de Western Sydney. Se construyó una plataforma de madera contrachapada reforzada de forma que la compresión se aplicara de forma uniforme en la bala, como indica la figura 7.5. Se adosó a la estructura de la máquina un aparato digital para medir el desplazamiento vertical y las lecturas se realizaron tanto con el medidor analógico como con el digital. Para las muestras sin recubrimiento, la carga se aplicó tanto a las balas colocadas en sentido horizontal como en vertical. En el caso



Fig. 7.5- Plataforma de reparto de cargas y medidor digital. [John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression]

¹ CONFER - Stephen Vardy and Colin MacDougall. Compressive testing and análisis of plastered straw bales [on line]. Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2005. [Consulta: 2 septiembre 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalebuilding.ca>>

² John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression [on line]. School of Construction, Property and Planning - University of Western Sydney, Australia. [Envío de John Q. Zhang recibido el 3 de agosto de 2006].

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

de las que tienen recubrimiento, la carga se aplicó solamente con éstas colocadas en sentido horizontal.

En todos los ensayos realizados, la muestra fue ensayada hasta la máxima deformación que la máquina podía experimentar. Para cada muestra se tomaron los datos de dimensiones y de peso. La carga se aplicó con un incremento de entre 0,5 y 2 KN y para cada incremento de carga se realizaba la lectura de la deformación. Estos datos se utilizaron para representar varias curvas de carga/deformación. La tabla que aparece a continuación contiene la información correspondiente a las muestras ensayadas¹.

Muestra	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Peso (Kg)	Recubrimiento	Notas
1	820	460	350	12,89	-	En horizontal y 3 ciclos de carga y descarga
2	820	470	360	13,21	-	En vertical y 3 ciclos de carga y descarga
3	800	460	350	13,27	-	En horizontal y 3 ciclos de carga y descarga
4	830	460	350	15,42	-	En horizontal
5	820	460	350	13,5	-	En vertical
6	720	350	350	-	40	Recubrimiento de barro y carga sólo en la bala
7	820	500	350	44,47	50	Recubrimiento de barro y carga sólo en la bala
8	750	500	350	-	50	Recubrimiento de barro y carga en bala y en barro
9	780	500	350	-	50	Recubrimiento de cemento y carga sólo en bala
10	750	500	350	-	50	Recubrimiento de cemento y carga sólo en la bala
11	760	500	350	42	50	Recubrimiento de cemento y carga en bala y en cemento

Tabla 7.1

7.2.2.3 Ensayo en balas de paja sin recubrimiento

Este ensayo se realizó de una forma sencilla aplicando la carga en la parte alta de la plataforma de reparto de carga como se puede ver en la figura 7.6. De las 5 muestras, 3 fueron ensayadas en sentido horizontal y dos en vertical para estudiar el efecto de la orientación de las balas en el comportamiento ante las cargas. También se utilizó un proceso de carga y descarga de 3 ciclos y baja frecuencia para ver la respuesta de las balas ante tales condiciones.

Los resultados que relacionan la tensión con la deformación se representan en el gráfico que aparece a continuación. En éste se observan 4 fases distintas en el proceso de carga. El proceso empieza con carga nula y deformación nula. La carga se empieza a aplicar hasta alcanzar un determinado valor a partir del cual se vuelve a reducir la carga hasta llegar al valor inicial de cero. Las ecuaciones que tienen término independiente representan el comportamiento simplificado de cada muestra ensayada.



Fig. 7.6- Plataforma de reparto de carga y medidor analógico de desplazamiento. [John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression]

¹ John Q. Zhang, op. cit.

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

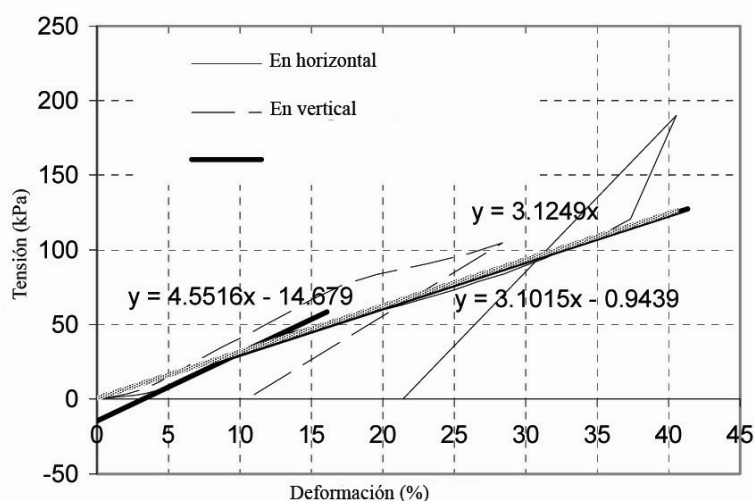


Fig. 7.7- Curvas de tensión – deformación de balas de paja sin recubrimiento y comportamiento simplificado. [John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression]

En la fase número 1, cuando se le aplica la primera carga a la bala, el material está blando y la resistencia es casi nula debido a la naturaleza de la bala. Esto se aprecia en la poca inclinación de la curva hasta un valor de deformación del 4%. Esta es la fase inicial de precompresión de la bala. Después de esta fase se aprecia un incremento significativo de resistencia, correspondiente a la fase 2 con deformación entre el 4% y el 12%. El comportamiento de la bala de paja en esta región es similar al de otros materiales de construcción convencionales como la madera o el hormigón, aunque con una menor rigidez. La carga se incrementa casi linealmente con el aumento de deformación y el comportamiento general se representa por una recta de regresión.

De estos datos podemos extraer que aplicando una precompresión a la bala de entre 3-4% se puede mejorar el comportamiento de la bala bajo compresión. Basándonos en ensayos realizados en paredes de balas de paja, éste es el nivel real de precompresión que ha sido conseguido¹. Más allá de este nivel se hace difícil la precompresión usando los métodos convencionales de cables.

Al superar el 12% de deformación (una carga aproximada de 15 kN), la bala entra en la fase número 3 en la que el material pasa a ser, en cierto modo, blando a causa de la compresión aplicada. A pesar de esto, la bala aún es capaz de soportar una importante carga adicional. La deformación aumenta a un ritmo superior al del incremento de la carga, indicando un cierto comportamiento plástico².

Este comportamiento plástico es similar al que sucede en la zona de fluencia en el acero. En el caso de las balas de paja, la deformación plástica tiene lugar cuando los tubos de paja huecos empiezan a colapsar. Aún así, el comportamiento es diferente al del acero, ya que la carga continúa aumentando significativamente. Este comportamiento es debido a que el colapso se produce de forma progresiva en las fibras sometidas a compresión. Este colapso, posiblemente, se propaga desde la superficie en contacto con la plataforma de carga hacia el centro de la bala, como indica la figura 7.8.

¹ John Q. Zhang, op. cit.

² CONFER - John Q. Zhang, op. cit.

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

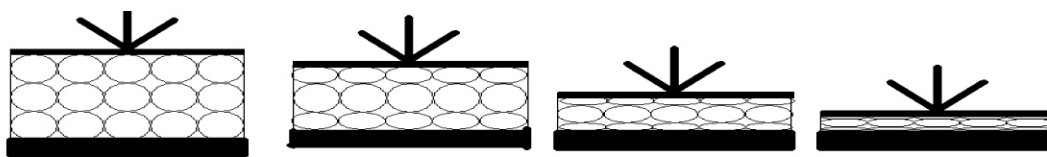


Fig. 7.8- Colapso progresivo de las balas de paja. [John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression]

La fase número 3 se extiende hasta que la deformación alcanza el 37%, y el comportamiento en este segmento es casi perfectamente lineal.

Finalmente, en la fase número 4 la bala de paja se hace más compacta y las lecturas muestran un material que se endurece, en el que cuanto mayor es la carga que se le aplica más resistente se hace. Aunque este comportamiento de endurecimiento está fuera de lo que es la deformación aceptable de uso, lo que indica es que, en caso extremo, el material tiene la capacidad para absorber una gran cantidad de energía sin que se produzca un fallo total de la estructura¹.

La mayor parte de los ensayos se paralizaron al alcanzar el máximo grado de deformación del aparato de medida. La muestra se fue descargando de forma controlada y se registró la deformación residual al nivel de carga nula. Para la muestra número 4 la deformación residual fue de 75 mm (21%) con una carga de 0 kN y la deformación residual cuando la muestra se recuperó por completo fue de 15 mm, como se aprecia en la gráfica de carga y deformación que aparece en la siguiente página. La fotografía que aparece a continuación ilustra a la perfección la fase final de compresión de la bala de paja.



Fig. 7.9- Fase final de compresión de bala de paja en sentido horizontal. [John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression]

¹ CONFER - John Q. Zhang, op. cit.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para los ensayos realizados en las balas colocadas en sentido vertical, el comportamiento en la fase inicial fue casi idéntico al de las balas en horizontal. En la fase número 2, la resistencia empezó a incrementarse de forma lineal con la deformación. A pesar de tener una superficie de carga menor, la resistencia y la deformación en este caso mostraron valores superiores al caso anterior. Un dato importante es que esta fase (la número 2) se prolongó hasta aproximadamente 20 kN (deformación del 17%). Luego la gráfica refleja un importante reblandecimiento (fase número 3) y la fase final de endurecimiento no se ve tan claramente.

Con el objetivo de comparar los resultados de balas que tienen diferentes dimensiones y balas ensayadas en distintas posiciones, los resultados analizados anteriormente se representaron como tensión y deformación (%). Algunas veces resulta más sencillo interpretar los resultados si se representan como carga y deformación (mm). La carga también se puede convertir a carga por metro lineal de pared (kN/m). Estos resultados se representan en las siguientes gráficas.

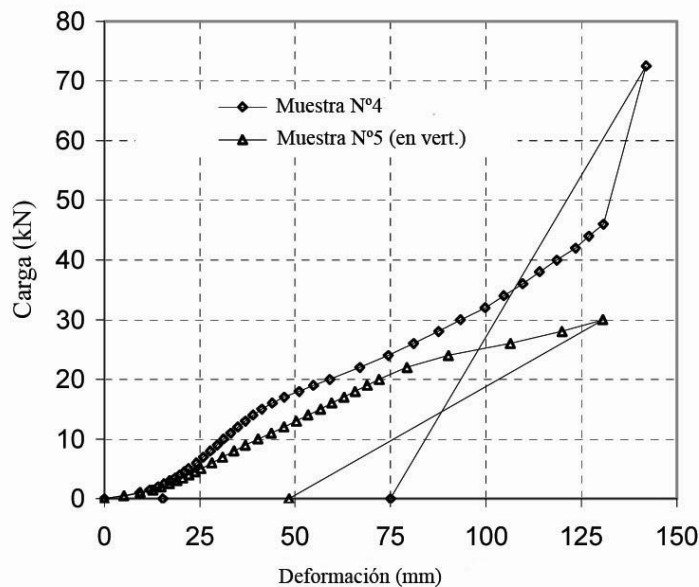


Fig. 7.10- Carga y deformación en mm. [John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression]

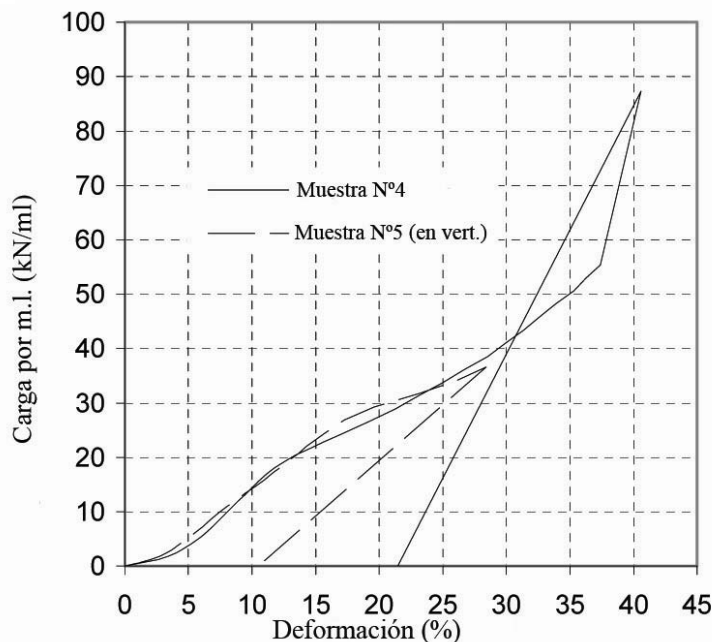


Fig. 7.11- Carga por metro lineal de pared y deformación en %. [John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression]



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En el ensayo de cargas cíclicas de baja frecuencia, las muestras 1, 2 y 3 fueron cargadas y descargadas un número de ciclos para investigar su efecto en las balas de paja. Los resultados se muestran en la gráfica que aparece a continuación junto con otros 2 ensayos de carga no cíclica. A partir de estos datos se observa que una carga cíclica de baja frecuencia no tiene una repercusión importante en las propiedades resistentes de las balas de paja¹.

Es importante decir que siempre hay un efecto de retraso en la recuperación de la bala cuando se retira la carga.

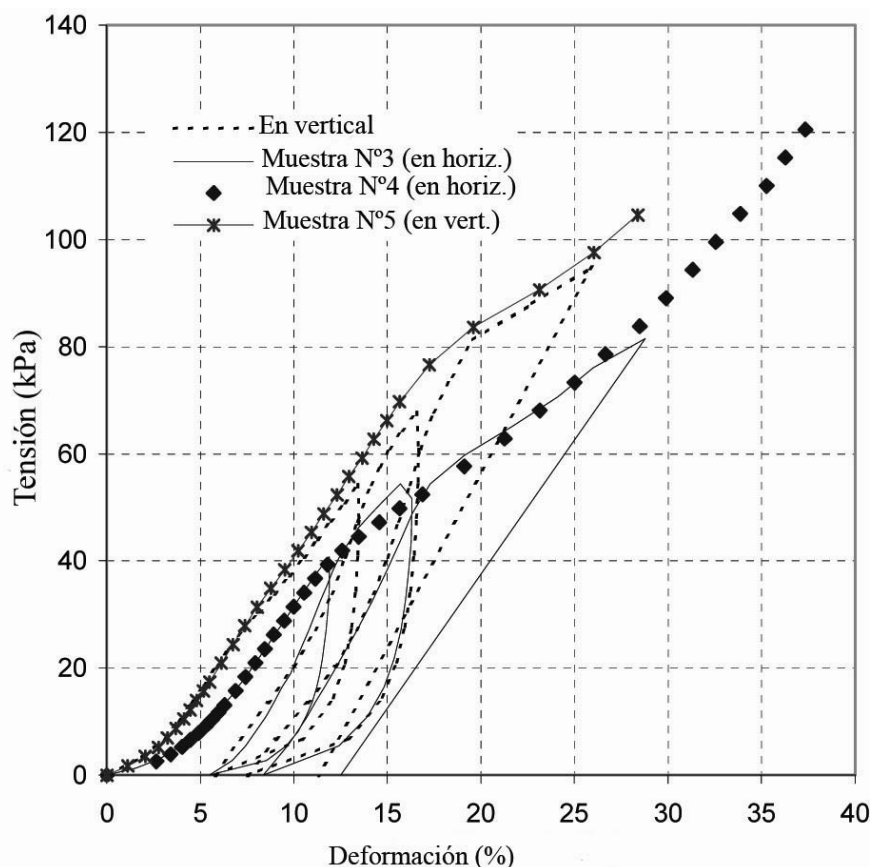


Fig. 7.12- Curvas de tensión – deformación bajo 3 ciclos de carga. [John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression]

7.2.2.4 Ensayos en balas de paja con recubrimiento

Para este ensayo se utilizaron dos tipos de materiales de recubrimiento, el barro y el cemento. El recubrimiento se aplicó en dos capas, a diferencia de la práctica habitual de construcción que se hace con un mínimo de 3. La razón de prescindir de esta última capa es que la última capa es la de acabado y es muy fina, por lo que no participa de manera significativa en el comportamiento estructural.

El espesor del recubrimiento no es absolutamente uniforme, pero el espesor mínimo es de 40 mm.

¹ CONFER - John Q. Zhang, op. cit.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para estudiar el efecto de la interacción entre el recubrimiento y la bala de paja se adoptaron los siguientes regímenes de carga:

- Solamente la bala de paja es directamente cargada en las partes inferior y superior
- Por la parte superior se carga directamente la bala de paja y por la inferior se cargan ambas.
- Se carga directamente la bala y el recubrimiento y la bala de paja tanto por la parte inferior como por la superior.

A continuación se describe cada método de carga.

Carga directa solamente en la bala

Se insertó una estructura de madera, tanto en la parte inferior como en la superior. Ésta tiene un poco menos de ancho que una bala de paja sin recubrimiento para que la carga se aplique directamente en la bala y no en el recubrimiento. La carga es transferida al recubrimiento simplemente por la unión entre el recubrimiento y la paja. Esto sucede en la primera fase de carga. Una vez que esta estructura de madera se va hundiendo en la bala, la carga directa empieza a aplicarse tanto a la bala como al recubrimiento. Esto sucede generalmente en la última fase de la carga y es en este momento cuando existe una gran deformación y aparecen grietas.

Parcialmente cargada de forma directa

En este método se utilizó una estructura de madera como la descrita anteriormente para colocarla en la parte superior, mientras que la bala de paja con el recubrimiento se apoya directamente en la plataforma inferior. De nuevo la plataforma superior empieza hundiéndose en la bala de paja pero debido al efecto de la reacción inferior, el recubrimiento se ve parcialmente cargado.

Carga directa tanto en la bala de paja como en el recubrimiento

Al igual que en el ensayo de las balas de paja sin recubrimiento, la carga se aplicó simultáneamente en la bala y en el recubrimiento a través de la plataforma de reparto de cargas.

La finalidad de utilizar diferentes regímenes de carga es la de investigar cuál es la mejor forma de cargar una pared de balas de paja para saber si se debe aislar la transmisión de la carga de la parte alta o de la inferior. También se puede ver si se obtiene algún beneficio en términos de resistencia si se aplica la carga simultáneamente. En principio, se observó que podía ser ventajoso aplicar la carga directamente en la bala. Esta es una forma de prevenir la aparición prematura de grietas en el recubrimiento ya que, de no ser así, estas grietas aparecerían a causa de la naturaleza frágil del recubrimiento, especialmente del que tiene cemento. Según se va comprimiendo la pared, toda la capa de recubrimiento se desplaza con relativa libertad, como una cortina y evitando la aparición de grietas.

En la siguiente gráfica se puede observar cómo se ha incrementado la resistencia, si realizamos una comparación con las balas sin recubrimiento. Esto se aprecia, sobre todo, en la fase número 2 del ensayo, en la que esta resistencia se puede traducir en un beneficio para el diseño. Curiosamente, apenas se nota la diferencia entre el recubrimiento de barro y el de cemento hasta que la muestra se ha agrietado de forma



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

extensiva (esto sucede con un 15% de deformación). El informe del ensayo no lo especifica, pero se supone que la forma de aplicación de la carga es de forma indirecta en el recubrimiento; de no ser así, la fase n°1 apenas existiría y la n°2 tendría una evolución mucho más vertical a causa de la rigidez, como podremos apreciar más adelante en unas gráficas de carga-deformación (figuras 7.26 y 7.28).

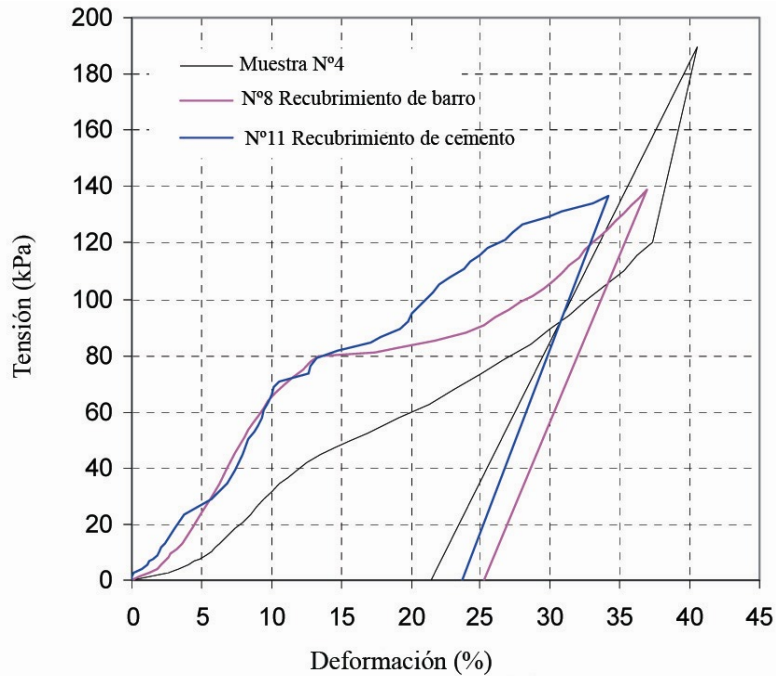


Fig. 7.13- Gráfica de tensión-deformación para balas de paja con recubrimiento. [John Q. Zhang. Load carrying characteristics of a single straw bale under compression]

A continuación se presentan una serie de fotografías que muestran el comportamiento de los recubrimientos ante los procesos de carga.



Fig. 7.14- Penetración de la estructura de carga superior. Es interesante observar el comportamiento del recubrimiento



Fig. 7.15- Estado de compresión final de una bala de paja con recubrimiento de barro



Fig. 7.16- Agrietamiento del recubrimiento de barro al final del ensayo



Fig. 7.17- Proceso de aplicación de carga de forma directa, tanto a la bala como al recubrimiento de cemento



Fig. 7.18- Rotura del recubrimiento de mortero de cemento



Fig. 7.19- Unión entre el recubrimiento de mortero de cemento y las fibras de paja

Comparación de resultados

En la siguiente gráfica se representan todos los ensayos (carga – deformación). Queda claro que las muestras con recubrimiento ofrecen una mayor resistencia que las que no lo tienen tanto si éste es de cemento como si es de barro. Las diferentes formas de aplicación de la carga no parecen tener relevancia en el comportamiento a pesar de que al observar las fotografías se aprecia el efecto en la aparición de grietas.

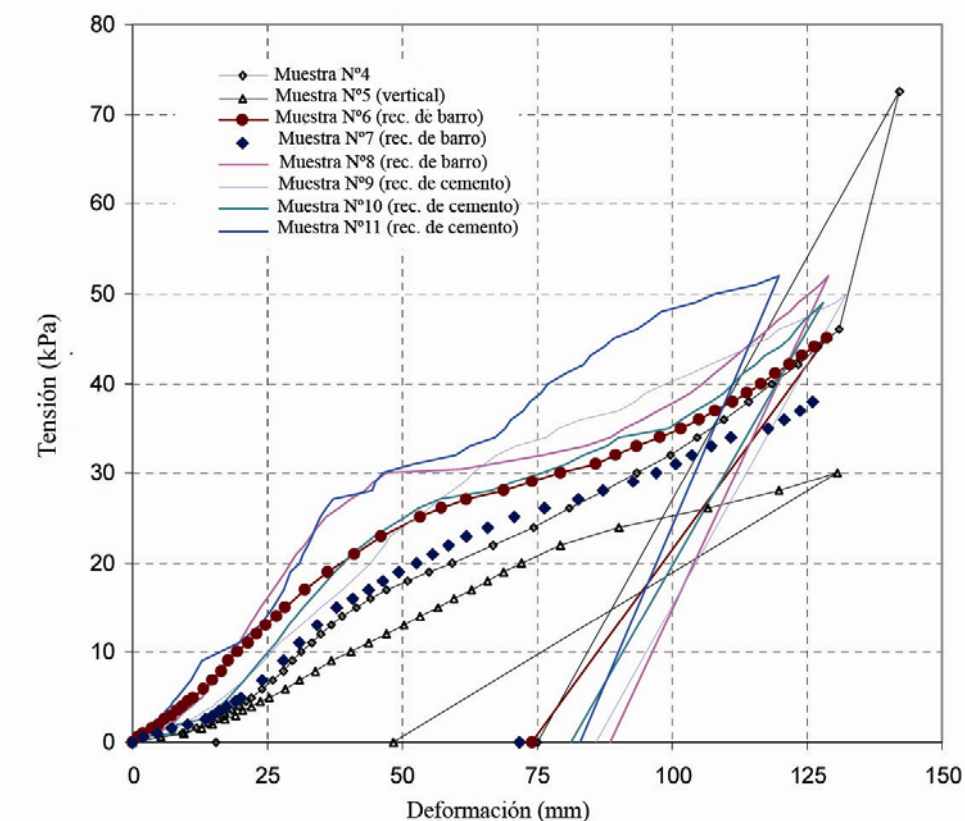


Fig. 7.20- Gráfica tensión-deformación para distinto tipo de muestras

7.2.2.5 Ensayo comparativo

Existen muchos otros ensayos de compresión de balas de paja, con y sin recubrimiento, y todos con objetivos similares. No vamos a analizarlos todos, ni mucho menos, pero sí vamos a comentar otro más para tener una visión de dos métodos de trabajo distintos para un mismo fin. Éste fue realizado por Stephen Vardy y Colin MacDougall¹ con el objetivo inicial de investigar el efecto de la orientación (horizontal o vertical) en la resistencia y rigidez de las balas de paja con recubrimiento.

El primer paso para la realización del ensayo fue la preparación de las balas. Para reducir la disparidad de los resultados de los ensayos se realizó una plantilla en madera a la que había que someter a las balas de paja para que el tamaño final de todas fuera igual. Las balas utilizadas fueron balas de dos cuerdas de paja de trigo que pesaban unos 12 kg, con unas dimensiones de 350x500x800mm. Esto equivale a una densidad de unos 85 kg/m³. Una vez que las balas se pusieron en la plantilla, se procedió a su recorte mecánico para alcanzar un espesor uniforme como muestran las siguientes fotografías.

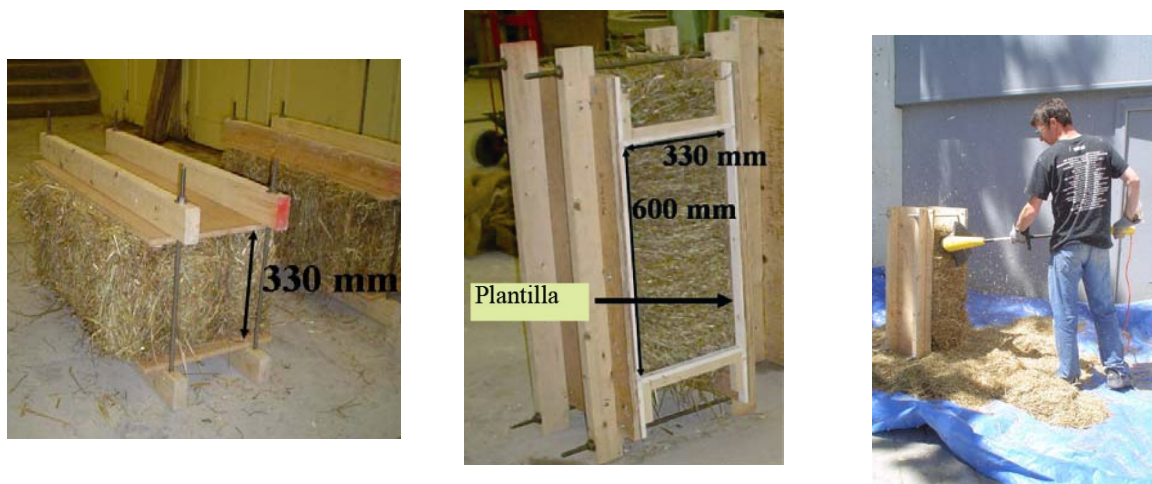


Fig. 7.21- Proceso de homogeneización del tamaño de las balas. [Stephen Vardy and Colin MacDougall. Compressive testing and análisis of plastered straw bales]

Para las balas colocadas en sentido vertical y con recubrimiento por los laterales, el espesor se controló recortando las fibras de la bala hasta 405 mm y la altura se controló comprimiéndola hasta los 330 mm. El resultado de este proceso es el que se aprecia en la fotografía.

El recubrimiento se aplicó en una única capa, a pesar de que no es lo habitual.



Fig. 7.22- Balas con recubrimiento para ensayo de resistencia a compresión. [Stephen Vardy and Colin MacDougall. Compressive testing and análisis of plastered straw bales]

¹ CONFER - Stephen Vardy and Colin MacDougall. Compressive testing and análisis of plastered straw bales [on line]. Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2005. [Consulta: 2 septiembre 2006].

La dosificación era 4,5:1,25:0,25 de arena, cal y cemento, y los espesores se indican en la tabla con los datos de las muestras.

El funcionamiento de los aparatos utilizados para el ensayo es, en líneas generales, similar al del caso anterior aunque con ciertas diferencias. Como se puede apreciar en la imagen, la forma de transmisión de carga de la máquina a la bala de paja con el recubrimiento es un poco distinta a la del caso anterior: existe una viga principal y dos secundarias de acero, además de piezas de madera para evitar la flexión del tablero de madera cuando se alcanzan cargas elevadas.

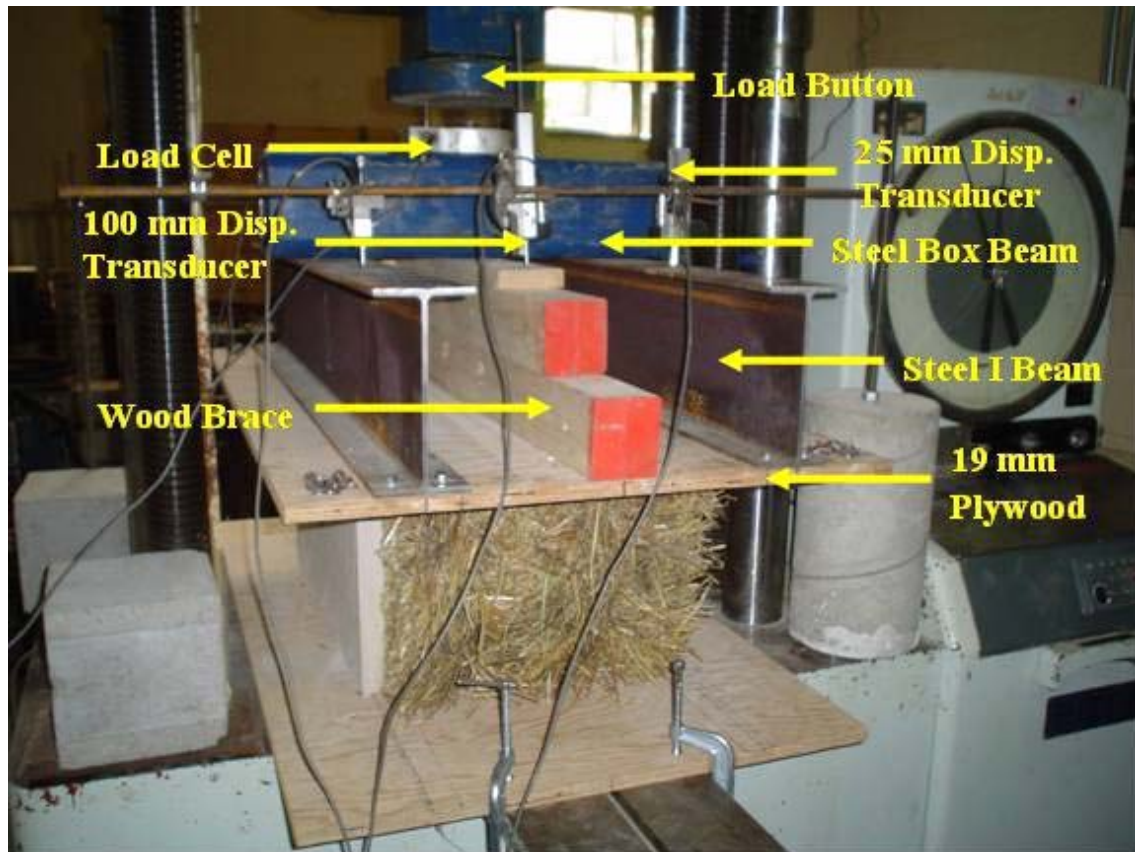


Fig. 7.23- Aparatos utilizados para el ensayo de compresión de una bala de paja con recubrimiento de mortero mixto. [Stephen Vardy and Colin MacDougall. Compressive testing and análisis of plastered straw bales]

Igual que en el caso anterior, la máquina dispone de un marcador analógico de desplazamiento pero, a mayores, se le instalaron 3 marcadores digitales.

El ensayo se realizó en un total de 30 balas de paja con recubrimiento y cada tipo variable de muestra se ensayó 3 veces. También se ensayó con unas muestras sin recubrimiento para ver cómo se comportaban sin éste. Las muestras 19-24 se excluyeron de los resultados porque se vieron dañadas por el agua. Los ensayos 28-30 fueron una repetición de los 19-21 mientras que los 22-24 no se repitieron.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Nº Ensayo	Resist. Recubrim.(Mpa)	Esp. Rec. (mm)	Orientación Bala	Comentarios
1,2,3	1,72	25,4	Horizontal	
4,5,6	1,72	25,4	Vertical	
7,8,9	1,2	25,4	Horizontal	
10,11,12	1,2	25,4	Vertical	
13,14,15	0,69	25,4	Horizontal	
16,17,18	0,69	25,4	Vertical	
19,20,21	1,72	38,1	Horizontal	Dañado agua
22,23,24	1,72	38,1	Vertical	Dañado agua
25,26,27	1,72	12,7	Horizontal	
28,29,30	1,72	38,1	Horizontal	Hecho de 2ª
31	-	-	Horizontal	No Recubrim.
32	-	-	Vertical	No Recubrim.

Tabla 7.2- Datos de las muestras a ensayar

Resultados de los ensayos.

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento ante la carga de las balas de paja sin recubrimiento.

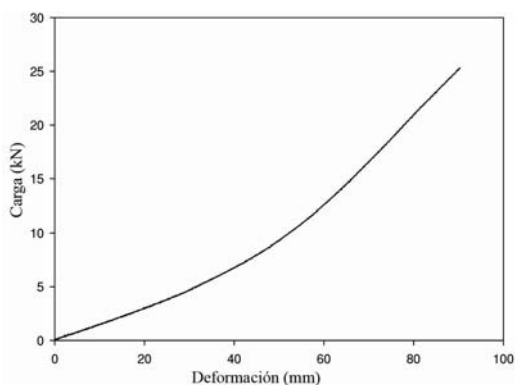


Fig. 7.24- Bala en sentido horizontal. [Stephen Vardy and Colin MacDougall. Compressive testing and análisis of plastered straw bales]

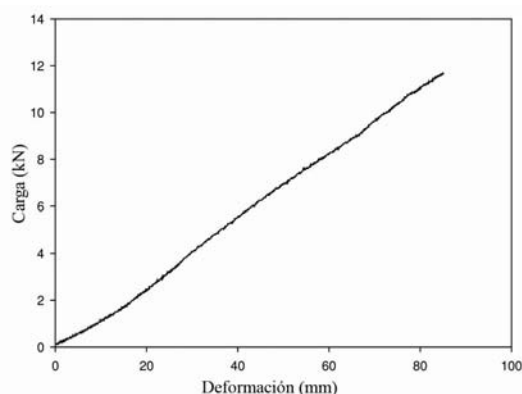


Fig. 7.25- Bala en sentido vertical. [Stephen Vardy and Colin MacDougall. Compressive testing and análisis of plastered straw bales]

Los valores que muestran estas gráficas no difieren mucho de los que resultaron del ensayo anteriormente analizado, en lo que se refiere a las fases de comportamiento. En la gráfica correspondiente a la bala en posición horizontal se aprecian perfectamente las fases número 1 y 2. Para hacer una comparativa y ver las variaciones con el ensayo realizado por John Q. Zhang, se puede establecer el punto de inflexión de la gráfica anterior en una carga de unos 10 kN con un desplazamiento de 50mm. En el ensayo de John Q. Zhang, este punto de inflexión se produce con menos carga, por lo que una vez alcanzados los 10 kN ya se está en la fase de incremento de resistencia. Para esta carga, el desplazamiento es de unos 30 mm. La causa es que estas balas del ensayo de John Q. Zhang estaban conformadas con una densidad de unos 115 kg/m³, por lo que la fase número 1 presenta un desplazamiento más corto, con una diferencia de desplazamientos posiblemente cercana a la que se aprecia en ambas muestras a los 10 kN.



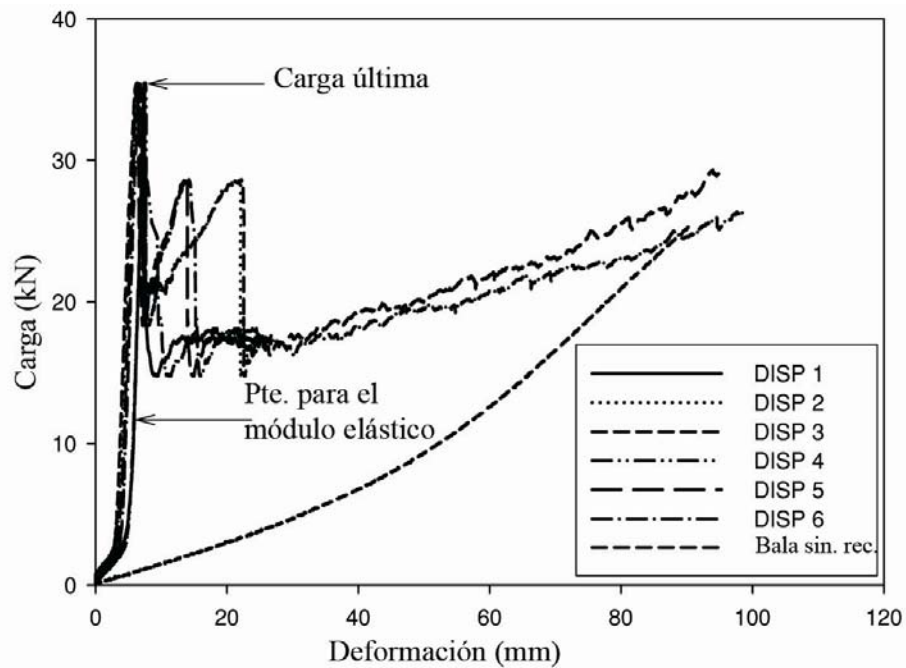


Fig. 7.26- Típica respuesta carga-deformación para las balas de paja con recubrimiento colocadas en sentido horizontal. Se aprecia perfectamente el punto de ruptura del recubrimiento. [Stephen Vardy and Colin MacDougall, op. cit.]



Fig. 7.27- Fallo típico de las balas de paja con recubrimiento colocadas en sentido horizontal [Stephen Vardy and Colin MacDougall, op. cit.]

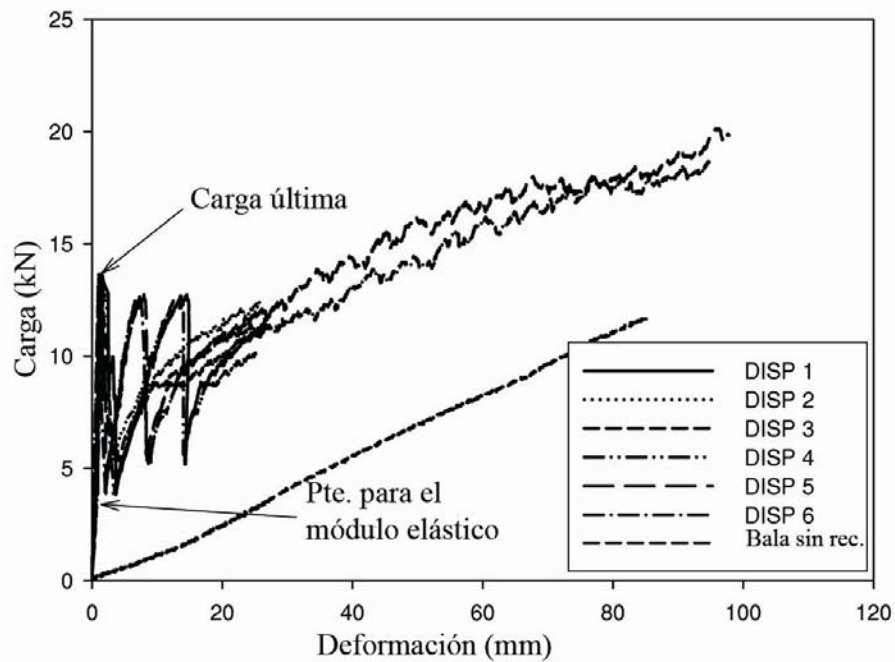


Fig. 7.28- Típica respuesta carga-deformación para las balas de paja con recubrimiento colocadas en sentido vertical. Se aprecia perfectamente el punto de ruptura del recubrimiento. [Stephen Vardy and Colin MacDougall, op. cit.]



Fig. 7.29- Fallo típico de las balas de paja con recubrimiento colocadas en sentido vertical. [Stephen Vardy and Colin MacDougall, op. cit.]

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En la siguiente gráfica se pueden apreciar con mayor detalle los valores de las cargas últimas y los tramos de las curvas utilizados para determinar el Módulo Elástico de las balas de paja con recubrimiento de mortero de cal y cemento. A éstas se le aplicó la carga de forma directa, tanto a la bala como al recubrimiento.

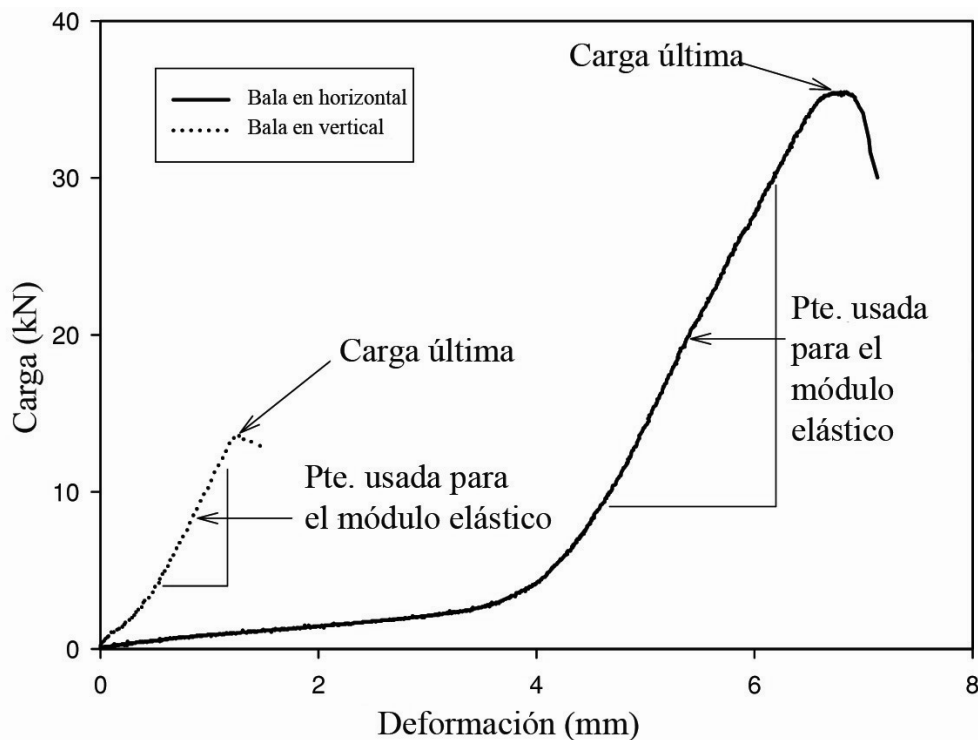


Fig. 7.30- Valores medios de carga-desplazamiento para balas de paja con recubrimiento. [Stephen Vardy and Colin MacDougall. Compressive testing and análisis of plastered straw bales]

Conclusiones

Los resultados de los experimentos realizados en balas de paja con recubrimiento de mortero de cemento han mostrado un número importante de parámetros que afectan a las propiedades estructurales de éstas:

- 1) La resistencia de una bala de paja con recubrimiento depende, en gran medida, de la orientación de ésta. Las balas de paja colocadas en sentido horizontal tienen mucha mayor resistencia a compresión que las colocadas en sentido vertical¹.
- 2) La forma de producirse un fallo es distinta para las balas en horizontal y para las balas en vertical. En las colocadas en vertical el fallo se produce por pandeo del recubrimiento, mientras que en sentido horizontal la rotura se produce en las zonas de aplicación de carga². La rotura por pandeo puede ser en parte debida a que el recubrimiento tiene menos capacidad de agarre con las fibras de las balas en esta posición.

¹ Stephen Vardy and Colin MacDougall, op. cit.

² Stephen Vardy and Colin MacDougall, op. cit.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

3) El espesor del recubrimiento aplicado tiene una gran influencia en la resistencia de la bala de paja. Se consigue mucho mayor beneficio aumentando al doble el espesor del recubrimiento que aumentando al doble la resistencia del mismo¹.

4) Prácticamente la totalidad de los ensayos realizados mostraron unas resistencias tan aceptables como para ser utilizadas en construcción, a excepción de las muestras que tenían un recubrimiento de 12,7 mm.²

5) Se observó que el módulo elástico de las balas de paja con recubrimiento de mortero de cemento es muy variable, ya que se obtuvieron valores desde 5,69 MPa hasta 26,76 MPa.

7.3 Características portantes del recubrimiento

7.3.1 Introducción

El recubrimiento juega un papel fundamental en el comportamiento estructural de una pared de balas de paja, ya que colabora para soportar las cargas que las balas tienen que resistir. Estas cargas pueden estar contenidas en el plano del muro o ser perpendiculares al mismo, y un ejemplo de estas últimas pueden ser las acciones horizontales de viento. La resistencia final de estos sistemas de pared depende tanto del recubrimiento como de las balas de paja.

Hemos visto anteriormente que hay muchos tipos posibles de recubrimiento para este tipo de paredes. Los que están compuestos por cemento y arena son muy resistentes a la compresión, la erosión y tienen mucha rigidez, pero suelen presentar el problema de agrietamiento cerca de las esquinas de los vanos. Este material de recubrimiento es ampliamente conocido por sus aplicaciones en muchos sistemas constructivos, aparte de la construcción con balas de paja. Hay otros muchos materiales de los que no se tienen tantos datos y que es importante estudiar para trabajar con ellos. Este es el motivo que ha llevado, en el año 2003, a Kelly Lerner (arquitecta estadounidense) y Kevin Donahue a realizar un estudio³ de las propiedades físicas de los recubrimientos compuestos a base de cal y cemento y a base de barro.

7.3.2 Composición de las mezclas a base de barro.

La composición de este tipo de recubrimiento depende mucho de la zona de trabajo, porque el tipo de suelo del que se extrae el barro varía bastante de unas zonas a otras. En previsión de esto, se fabricaron varias muestras con distintos tipos de suelos y distintas cantidades de componentes. La composición de las distintas muestras se refleja en la siguiente tabla⁴:

¹ Stephen Vardy and Colin MacDougall, op. cit.

² Stephen Vardy and Colin MacDougall, op. cit.

³ Kelly Lerner y Kevin Donahue. Structural Testing of Plastered for Straw Bale Construction [on line]. California, 2003. [Consulta: 26 Agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalebuilding.ca>>

⁴ Kelly Lerner y Kevin Donahue, op. cit.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Composición de las muestras de recubrimiento				
Muestra	Arcilla (%)	Restos (%)	Arena (%)	Paja picada (%)
A	13	8	4	75
B	13	8	23	56
C	13	8	29	50
D	13	8	41	38
E	13	8	54	25
F	13	8	60	19
G	13	8	79	0

Tabla 7.3

Composición de las mezclas a base de cemento

Para este mortero, al igual que en el caso anterior, la dosificación se hizo en volumen y está formada por 1 parte de cemento Pórtland, 1 parte de cal y 6 partes de arena, con la suficiente agua para producir una mezcla trabajable.

7.3.3 Erosión

Este ensayo, que no correspondía con ninguna norma conocida (fue diseñado por la autora del mismo), se realizó únicamente con 3 de las muestras que contenían arcilla: la A, la C y la G. Estas 3 muestras fueron seleccionadas por su contenido de paja y arena. La muestra A tiene un bajo contenido de arena y elevado de paja triturada, la C un contenido medio de arena y medio de paja y la G elevado de arena pero nulo de paja.

Las muestras, de 30 x 30 x 5 cm., se colocaron con una inclinación de 30 grados sexagesimales con la horizontal. Sobre estas se aplicó un goteo constante de agua a un ritmo de 4,5 litros por hora. La muestra G estaba descompuesta a los 40 minutos, como se aprecia en la fotografía. La C presentó una grieta después de 1 hora y 45 minutos y la A, después de 6 horas se desplomó ligeramente pero manteniendo su forma.



Fig. 7.31- Muestra A [Kelli Lerner, op. cit.]



Fig. 7.32- Muestra G [Kelli Lerner, op.



7.3.4 Resistencia a compresión

Los ensayos de compresión se realizaron en todas las muestras según la norma ASTM C109. En el caso de las muestras de arcilla, arena y paja, los resultados mostraron valores de resistencia muy parecidos para las distintas dosificaciones, salvo para los casos extremos con muy bajo o nulo contenido de arena o de paja. Las muestras con mucha paja y poca arena tienden a fallar a causa de la flexibilidad y las que tienen mucha arena y poca paja muestran un comportamiento muy frágil¹.

En el caso del mortero de cal, cemento y arena, como era de esperar, se obtuvieron valores de resistencia mayores que los del caso anterior, aunque no tanto como se esperaban antes de realizar el ensayo.

Estos datos sirven para conocer la resistencia a compresión de estos materiales, pero no sirven para aplicar directamente al comportamiento estructural que puedan tener en una pared de balas de paja. Una vez que el recubrimiento está colocado en su posición y, si es el caso, está en proceso de carga, su comportamiento es muy distinto al reflejado en el ensayo. En primer lugar, la orientación a la hora de soportar la carga es distinta y en segundo lugar, en esta situación aparecen muchos factores que afectan al comportamiento estructural. Como ejemplos se pueden mencionar la adherencia del mortero con la superficie de la pared o la forma de transmisión de la carga al recubrimiento (directa, indirecta,...).

¹ CONFER - Kelly Lerner y Kevin Donahue, op. cit.





CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

7.4 Asiento de las balas apiladas

7.4.1 Introducción

Antes de hablar de las cargas que puede llegar a soportar una pared construida con balas de paja, veamos cuál es su comportamiento ante diferentes cargas y diferentes formas de aplicación; éste es el estudio que realizó a lo largo de un año Dan Smith, miembro de DSA Architects¹. El ensayo está dirigido a determinar el asiento de varias paredes de balas de paja cargadas durante 12 meses.

7.4.2 Descripción del ensayo

En primer lugar, existen dos pilas de 6 balas de tres cuerdas. Estas muestras no tenían recubrimiento y fueron ensayadas comparativamente con cargas aplicadas de forma uniforme, reducidas (1,77 kN) (180 Kg) y elevadas (7,12 kN) (726 Kg). Ambas pilas estaban formadas por las balas colocadas en sentido horizontal.

El segundo grupo está formado por 3 pilas de 6 balas cada una; la primera pila es de paja de trigo de tres cuerdas, la segunda de paja de arroz de 2 cuerdas y la tercera también de paja de arroz pero de 3 cuerdas. Las dos primeras pilas estaban formadas con las balas colocadas en sentido horizontal y la última pila con las balas en sentido vertical. Las tres pilas de balas fueron ensayadas con cargas elevadas.

Un tercer grupo formado por dos pilas de balas está destinado a estudiar el efecto de cargas intermitentes para simular el efecto de un sismo con cargas reducidas y elevadas.

Para terminar, existe un cuarto grupo de balas de paja con recubrimiento, una pila con mortero de cal y cemento y la otra con barro.

El ensayo consiste en un total de 9 pilas de 6 balas de paja cada una y con una carga determinada en la parte superior de éstas. Las balas están colocadas unas en sentido horizontal y otras en sentido vertical (a medio pie y a tabicón) y están metidas en una estructura muy sencilla que facilita la medición del desplazamiento vertical. La carga está compuesta por cajones con arena colocados en la parte alta de las pilas y el asiento se mide al comienzo y, aproximadamente, a los días 1, 2, 7, 14 y a los meses 1, 2, 6 y 12.

Grupo inicial: este grupo está compuesto por balas de tres cuerdas de dimensiones 58 x 120 x 38 cm. de paja de arroz con varias cargas continuas.

Ensayo A: carga reducida de 1,77 kN (180 Kg).

Ensayo B: carga elevada de 7,12 kN (726 Kg).

Grupo comparativo: éste está destinado a ensayar unas variables específicas. Para el ensayo C se utiliza paja de trigo (con una pequeña variación en las dimensiones, 112 cm de largo y 38 cm de grosor). En el ensayo D se reduce el espesor, pasando a una bala de paja de dos cuerdas de 46 cm de ancho y 117 cm de largo. Para el ensayo E se utilizan, otra vez, balas de 3 cuerdas, pero colocadas en vertical (a medio pie), cambiando la dirección de la paja y apilando solamente 4 balas en este caso.

Ensayo C: balas de 3 cuerdas de paja de trigo con 7,12 kN (726 Kg).

¹ CONFER – Dan Smith. Creep in Bale Walls [on line]. Berkeley, California, 2003. [Consulta: 8 septiembre 2006]. Disponible en web: <<http://www.dsaarch.com>>





CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Ensayo D: balas de 2 cuerdas de paja de arroz con 7,12 kN (726 Kg).

Ensayo E: balas de 3 cuerdas de paja de arroz en vertical con 7,49 kN (764 Kg).

Grupo de carga intermitente: éste tiene las mismas condiciones iniciales que el primer grupo, aunque la pila de balas ha sido envuelta por una malla de gallinero para mantener la compresión. Se aplicó la carga, la pila de balas recibió la compresión inicial, se fijó la malla para evitar la expansión de las mismas y luego se retiró la carga. La carga se volvió a aplicar 44 semanas después.

Ensayo F: carga reducida intermitente de 1,77 kN (180 Kg).

Ensayo G: carga elevada intermitente de 7,12 kN (726 Kg).

Grupo enfoscado: este grupo fue diseñado para estudiar los efectos del recubrimiento en el asentamiento. Las paredes fueron recubiertas por las dos caras 10 días después de alcanzar la carga máxima. Se utilizó una malla metálica de gallinero metida en el interior del recubrimiento y en la base se dejó un espacio sin recubrimiento para que éste pudiera asentar.

Ensayo H: recubrimiento de barro con carga de 1,77 kN (180 Kg).

Ensayo I: recubrimiento de cal y cemento con carga de 7,12 kN (726 Kg).

La mezcla de cal y cemento estaba formada por 4 partes de cemento Pórtland, 1 parte de cal y 20 de arena.

El ensayo está, en cierto modo, basado en el *Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression* (ASTM-C512-87), que era el procedimiento publicado comparable más próximo. Este procedimiento se ha tenido que modificar de manera considerable para poder ser utilizado en balas de paja. La muestra a ensayar es una pila de 6 balas de paja frente a los cilindros de hormigón de Ø15 cm y 38 cm de altura (en pulgadas son 6 y 12).

7.4.3 Resultados y conclusiones

Notas generales

Compresión inicial: produce un asiento inicial que se midió en la parte frontal en el lado derecho. Esta medida varió de forma impredecible, pero como no era éste el objetivo principal, se hicieron gráficas comparativas de asiento después de la compresión inicial. Las balas no fueron asentadas de una forma cuidadosamente uniforme o aplicándole una precompresión, como se suele hacer en la construcción real (exceptuando los casos de carga intermitente). Se puede decir que esta fase es la destinada a que las superficies de las balas se amolden a las de la bala contigua. Por otro lado, se considera el asiento como el período en el que las fibras individuales se deforman con el tiempo y la carga. Ambos sucesos ocurren, hasta cierto punto, de forma simultánea por lo que resulta difícil separar uno del otro. Tras la compresión inicial con la carga de 1,77 kN (180 Kg), el asiento fue de 1'' (2,54 cm) o de 1,1% (el % se expresa con relación a la altura total de una pila de balas de 90'' (2,286 metros). El asiento para la carga inicial de 7,12 kN (726 Kg) en la bala de 3 cuerdas fue de 2,25'' (5,72 cm) o de 2,5%. Observar que el asiento, con la misma carga pero en las balas de 2 cuerdas, fue del 4,5%.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Asiento temprano: éste se produce de forma relativamente rápida en las primeras 1-2 semanas, por lo menos bajo cargas elevadas.

Asiento decreciente: después del período inicial, la mayoría de las paredes se fueron asentando de una forma más lenta durante otras 5 u 8 semanas.

Estabilización: después de 10 semanas, la mayor parte de las paredes parecen estar estables, sin continuar el proceso de asentamiento. En general, el asiento en las balas de paja de 3 cuerdas estuvo en torno a las 0,8'' para carga reducida (0,9%) y a 1,1'' para carga elevada (1,2%), en este período.

A diferencia de las demás muestras, la pared que está sometida a una mayor presión, que es la de balas de dos cuerdas de paja de arroz, continuó el proceso de asiento durante este período. Además, la pared de balas de paja de arroz colocadas en sentido vertical (a tabicón) mostró un período de asiento mucho mayor (43 semanas), antes de una mínima estabilización, y el asiento en este período estuvo en torno al 1%.

Paredes con cargas intermitentes

Estas paredes solamente asentaron después de 8 meses, una vez que se aplicó por segunda vez la carga, un 20% del asiento producido con la precompresión inicial. Por ejemplo, la compresión inicial en la muestra G provocó un asiento de 2,75'' y 50 semanas después, cuando se volvió a aplicar la carga, asentó 0,75''. Esto justifica la importancia de aplicar una precompresión a las paredes de balas de paja antes de aplicar el recubrimiento cuando van a estar sometidas a seísmos o cargas de nieve.

Las paredes con recubrimiento

La pared que tiene recubrimiento de cal y cemento con una carga de 7,12 (726 kg) no mostró un asiento significativo. Esto era de esperar ya que la carga aplicada era de servicio y no tan próxima a la carga última como para mostrar asiento.

La pared que tiene recubrimiento de barro y una carga de 1,77 kN (180 kg) mostró un pequeño asiento de 1,5'' en las primeras semanas mientras la capa de recubrimiento se estaba secando. A esta pared, al igual que la otra, se le había proporcionado una precompresión con la carga aplicada durante 1,5 semanas antes del recubrimiento.



Fig. 7.33- Paredes de balas de paja del grupo de carga intermitente pertenecientes al ensayo. [Dan Smith, DSA Architects. Creep in bale

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

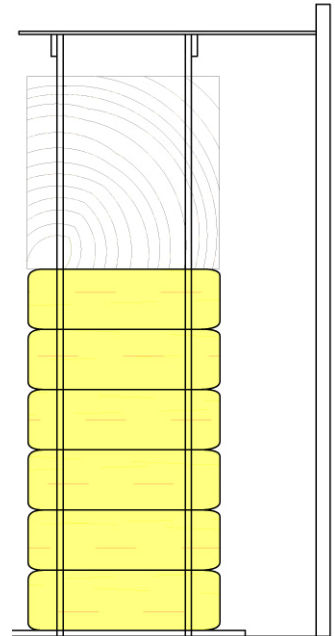
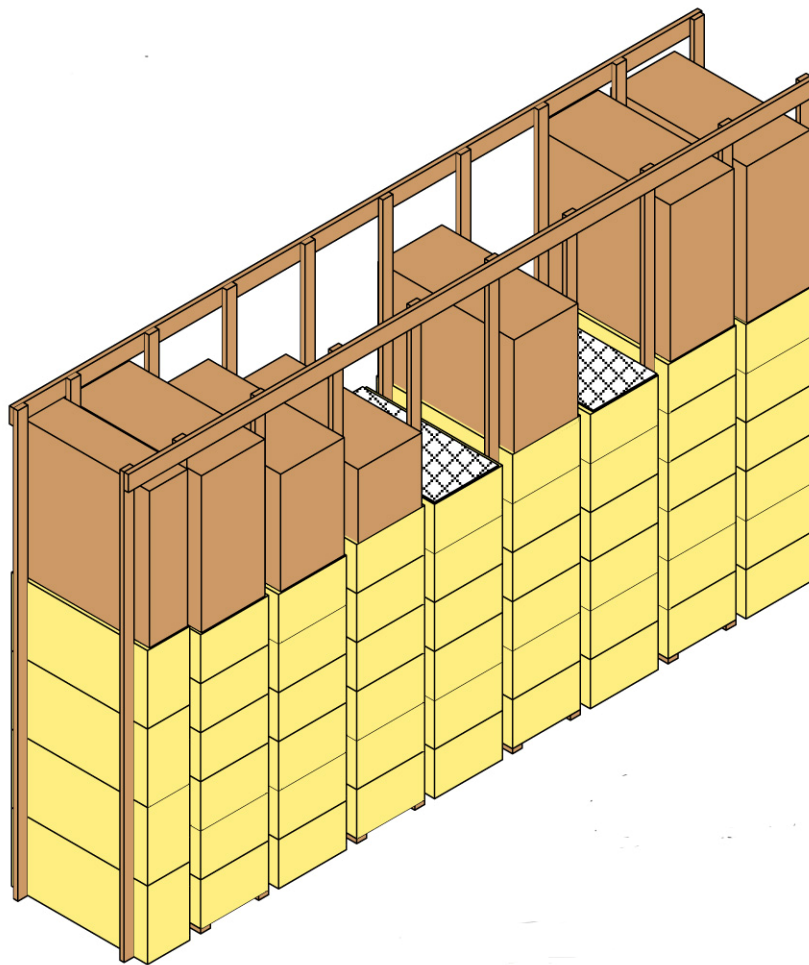
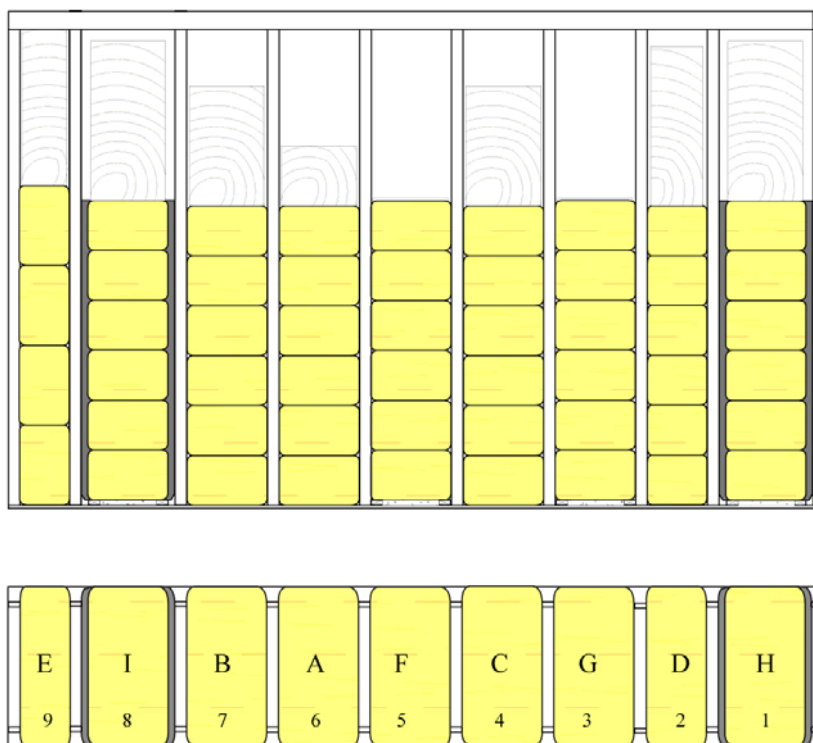


Fig. 7.34- Vista lateral de la configuración de las paredes de balas de paja para el ensayo



- 1-Recubrimiento de barro – 1,77 kN.
- 2-Bala de 2 cuerdas de paja de arroz – 7,12 kN.
- 3-Carga elevada (7,12 kN) de forma intermitente.
- 4-Bala de 3 cuerdas de paja de trigo – 7,12 kN.
- 5-Carga reducida (1,77 kN) de forma intermitente.
- 6-Bala de paja de arroz con carga reducida – 1,77 kN.
- 7-Bala de paja de arroz con carga elevada – 7,12 kN.
- 8-Recubrimiento de cal y cemento – 7,12 kN.
- 9-Bala de 2 cuerdas de paja de arroz en vertical – 7,49 kN.

Fig. 7.35- Planta y alzado de la configuración de paredes de balas de paja

7.4.4 Gráfica de asiento de las paredes de balas de paja



Fig. 7.36

La columna vertical de la izquierda es el desplazamiento vertical, expresado en pulgadas, y la de la derecha es lo mismo, pero expresado en porcentaje respecto a una pared de balas de paja de altura 90' (2,29 metros).

Nomenclatura

- Balas de 3 cuerdas de paja de arroz con carga reducida (1,77 kN)
- Balas de 3 cuerdas de paja de arroz con carga elevada (7,12 kN)
- Balas de 3 cuerdas de paja de trigo con carga elevada (7,12 kN)
- Balas de 2 cuerdas de paja de arroz con carga elevada (7,12 kN)
- Balas de 3 cuerdas de paja de arroz con carga elevada (7,49 kN)
- Balas de 3 cuerdas de paja de arroz con carga intermitente (1,77 kN)
- Balas de 3 cuerdas de paja de arroz con carga intermitente (7,12 kN)
- Balas de paja con recubrimiento de barro y carga reducida (1,77 kN)
- Balas de paja con recubrimiento de cal y cemento y carga elev. (7,12 kN)

7.5 Características portantes de una pared de balas de paja

7.5.1 Comportamiento del muro y formas de fallo

Las paredes de balas de paja sin recubrimiento simplemente pueden soportar una carga reducida antes de alcanzar unos límites admisibles o de desestabilizarse. Una vez que se le ha aplicado el recubrimiento, su capacidad de soportar carga aumenta considerablemente, y más si cuenta con una estructura de coronación que transmita uniformemente la carga.

Ante cargas verticales, comprendidas en el plano de la pared, existen cinco clases de fallo.

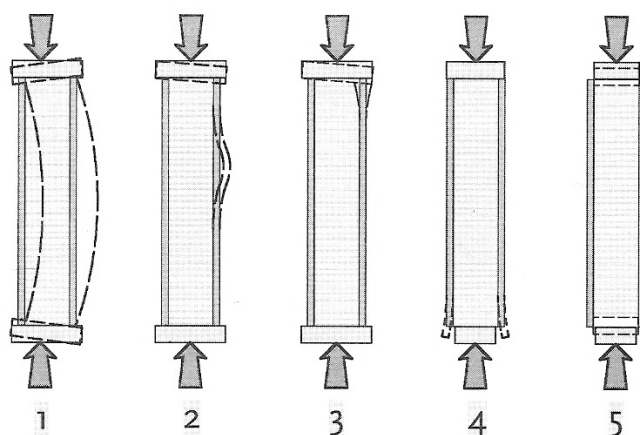


Fig. 7.37- Posibles formas de fallo de una pared de balas de paja ante compresión axial [Bruce King con Mark Sschheim, Kevin Donahue, David Mar y Dan Smith, op. cit.]

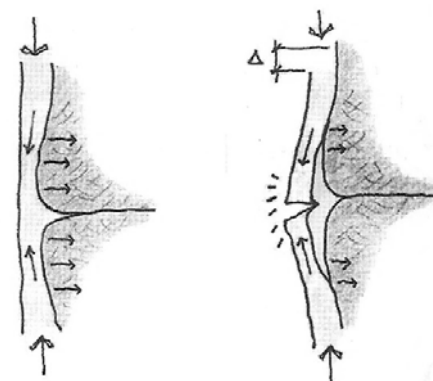
1. Pandeo total

La pared completa se curva y se agrieta. Suele suceder cuando el muro está bien construido pero la carga se aplica de forma excéntrica.

2. Pandeo local

Parte del recubrimiento se suelta de la pared. Puede ser resultado de una mala calidad de las fibras de paja (muy cortas) o de una mala ejecución del recubrimiento, sobre todo de la primera capa de agarre. Suele suceder cuando se le transmite carga al recubrimiento directamente.

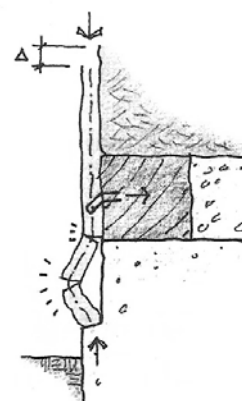
Fig. 7.38- [Bruce King con Mark Sschheim, Kevin Donahue, David Mar y Dan Smith, op. cit.]



3. Agotamiento del recubrimiento

El recubrimiento supera la tensión admisible en la coronación o en la base y se rompe en dichas zonas. Suele ser a causa de un defecto de diseño, bien del sistema de transmisión de carga, del tipo de material o incluso del espesor del mismo.

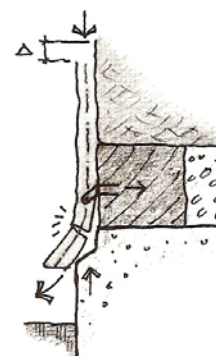
Fig. 7.39- [Bruce King con Mark Sschheim, Kevin Donahue, David Mar y Dan Smith, op. cit.]



4. Deslizamiento de las capas

Las capas de recubrimiento no encuentran reacción a la carga en un extremo mientras que el núcleo de paja sí, dando lugar a desplazamientos relativos de ambos.

Fig. 7.40- [Bruce King con Mark Sschheim, Kevin Donahue, David Mar y Dan Smith, op. cit.]



5. Compresión sólo del núcleo de paja

El núcleo de balas de paja se encuentra sometido a carga mientras que las capas de recubrimiento están libres. Al igual que en el caso anterior, se producen desplazamientos relativos.

7.5.2 Análisis técnico

7.5.2.1 Descripción del ensayo para una pared de dos plantas de altura

En el año 2000, Michael Faine y el Doctor John Zhang realizaron un estudio piloto¹ en una pared construida con balas de paja con el objetivo de examinar la aptitud de estas paredes para la construcción residencial de dos plantas de altura. Sus esfuerzos se centraron en la resistencia y compresibilidad de estas paredes. El ensayo se realizó en condiciones de laboratorio y, según los resultados, llegaron a la conclusión de que era viable la construcción de una pared de estas características utilizando este sistema. Esta conclusión se debe interpretar con prudencia, porque existen muchos factores que influyen en su comportamiento, no sólo la altura.

El estudio se realizó para saber qué le podía suceder a una pared de este tipo que fuera uniformemente cargada y con una carga distribuida. Lo que no analizó, y es de fundamental importancia, es la resistencia a las cargas de viento que, con una altura de 2 plantas, es una carga de suficiente magnitud como para tener en cuenta.

Las instalaciones utilizadas para realizar el estudio fueron las del laboratorio de construcción de la Universidad de Western Sydney. Se construyó una pared de balas de paja entre dos soportes de acero que, a su vez, hacían de soporte de la máquina encargada de aplicar la carga a las muestras que allí se realizaban.



Fig. 7.41- Instalaciones del laboratorio con la pared de balas de paja – Pilot Study: Two storey load bearing straw bale wall – University of Western Sydney – Michael Faine and Dr. John Zhang (Julio de 2000)

¹ Michael Faine y Dr. John Zhang, University of Western Sydney, Australia. A Pilot Study examining the Strength, Compressibility and Serviceability of Rendered Straw Bale Walls for Two Storey Load Bearing Construction [on line]. Primera Conferencia Internacional sobre Estructuras de Construcciones Ecológicas, Centro Santa Sabina, San Rafael, California, Julio de 2000. [Consulta: 17 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalebuilding.ca>>

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

La pared tiene unas 11 filas de balas y una altura total (sin comprimir) de 4.045 mm. La separación entre soportes es de 2.600 mm. y tiene una plancha de madera en los extremos para evitar que las balas, durante el proceso de compresión, penetren en el espacio entre las alas del perfil metálico. Con función de cimentación, en la base de la pared se colocó un perfil metálico en forma de H al que se soldaron unas barras de acero corrugado de 12mm de \varnothing para que las balas no se desplazaran. Esta forma de trabar las balas se continuó hasta llegar a la parte superior. Las balas utilizadas eran aproximadamente de 840 x 460 x 360 mm y se colocaron en sentido horizontal.

El siguiente paso fue recortar la superficie del muro de forma mecánica para que esta quedara lo más lisa posible. Esto quizás sea un error, aunque lo sería aún mayor en el caso de que a la pared no se le pudiese por el exterior una malla, ya que el recubrimiento se agarra mejor a la pared si la superficie de ésta es irregular que si es muy uniforme.

Con unos cables que rodeaban toda la pared desde la base hasta la parte superior, se le aplicó a la pared una precompresión, con lo que se consiguió reducir la altura total, quedando ésta en 3.955 mm.



Fig. 7.42- Estructura para reparto de cargas en la coronación. [Michael Faine y Dr. John Q. Zhang, op. cit.]



Fig. 7.44- Proceso de aplicación del recubrimiento. [Michael Faine y Dr. John Q. Zhang, op. cit.]

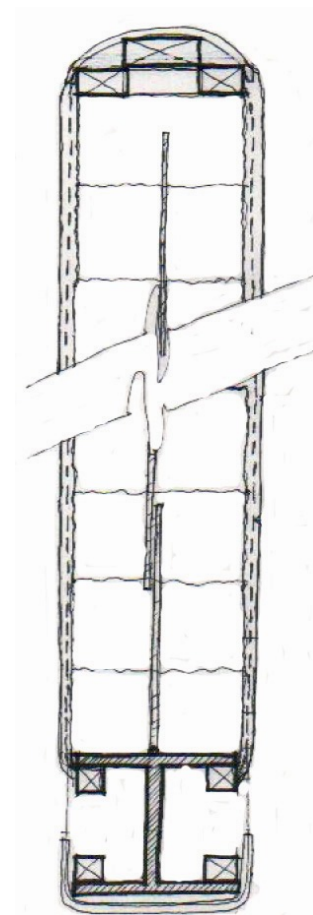


Fig. 7.43- Sección vertical del muro. [Michael Faine y Dr. John Q. Zhang, op. cit.]

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Una malla metálica tipo gallinero se extendió por las dos caras de la pared, pasando por la parte superior y en esta misma zona se colocó una estructura de madera para que el reparto de cargas fuera uniforme.

Una vez realizadas todas estas tareas, se comenzó con la aplicación del recubrimiento. Se aplicó en dos capas con un espesor final de 60 mm durante un período de 2 semanas y la dosificación fue 1:4:0,5 de cemento, arena y cal.

El proceso de aplicación de la carga fue bastante sencillo: en la coronación del muro se colocaron dos cilindros hidráulicos de 10 toneladas de carga máxima, apoyados contra una viga en la parte superior como indica la fotografía.

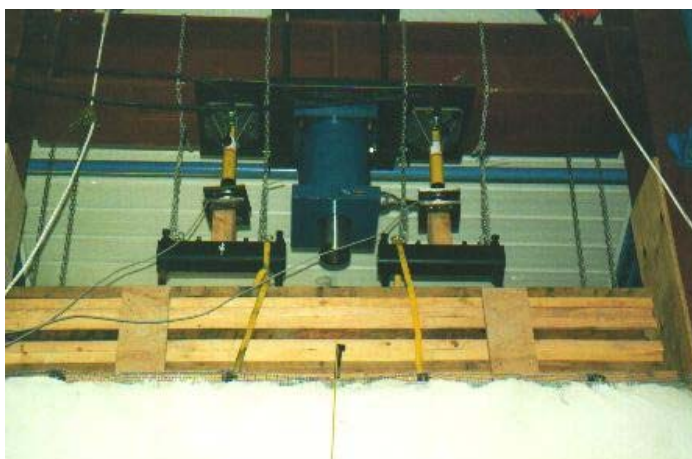


Fig. 7.45- Prensas hidráulicas en la coronación de la pared. [Michael Faine y Dr. John Q. Zhang,

Durante el ensayo se recogieron los datos de carga y desplazamiento vertical. También se utilizaron dos teodolitos para realizar visuales a unas marcas realizadas previamente en la pared y comprobar cualquier movimiento lateral.

7.5.2.2 Resultados del ensayo

El ensayo tuvo una duración de, aproximadamente, una hora y consistió en aplicar progresivamente la carga a la pared, anotar las lecturas de carga, el tiempo y la deformación de la pared¹. Cada ciclo de cargas duraba entre 2,5 y 3,5 minutos con un incremento de carga de aproximadamente 5 kN hasta alcanzar una carga total de unos 126 kN.

Durante los primeros 14 minutos del ensayo no se apreciaron movimientos ni fisuras. A partir de este tiempo sí se comenzaron a oír ruidos de roturas en la parte superior. A los 22 minutos ya se había soltado alguna parte del recubrimiento, aunque sin apreciación de agrietamiento en la cara de la pared. A los 28 minutos se escuchaban más sonidos de rotura y se apreciaba una pequeña protuberancia en una de las caras de la pared. A los 30 minutos se escuchaban aún más ruidos de agrietamiento pero sin aparición de grietas en la superficie de la pared. A los 35 minutos empezaba a caer parte del recubrimiento de la parte superior y a

¹ CONFER – Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

los 43 minutos se apreció la separación del recubrimiento en la parte inferior. El ensayo se paralizó a los 50 minutos¹.

La siguiente tabla² refleja las cargas y las deformaciones verticales:

Carga (kN)	Deformación vertical (mm)		
	Izquierda	Derecha	Promedio
0	0	0	0
4,266	0	0	0
8,885	0	0	0
19,818	0	2	1
29,836	-1	4	1,5
39,292	-2	7	2,5
50,416	0	12	6
60,389	9	17	13
72,931	19	23	21
80,491	37	39	38
90,425	69	102	85,5
100,556	69	117	93
110,681	72	127	99,5
120,717	73	137	105
125,786	77	147	112

Tabla 7.4

Los resultados de la tabla están representados en la gráfica que aparece a continuación.

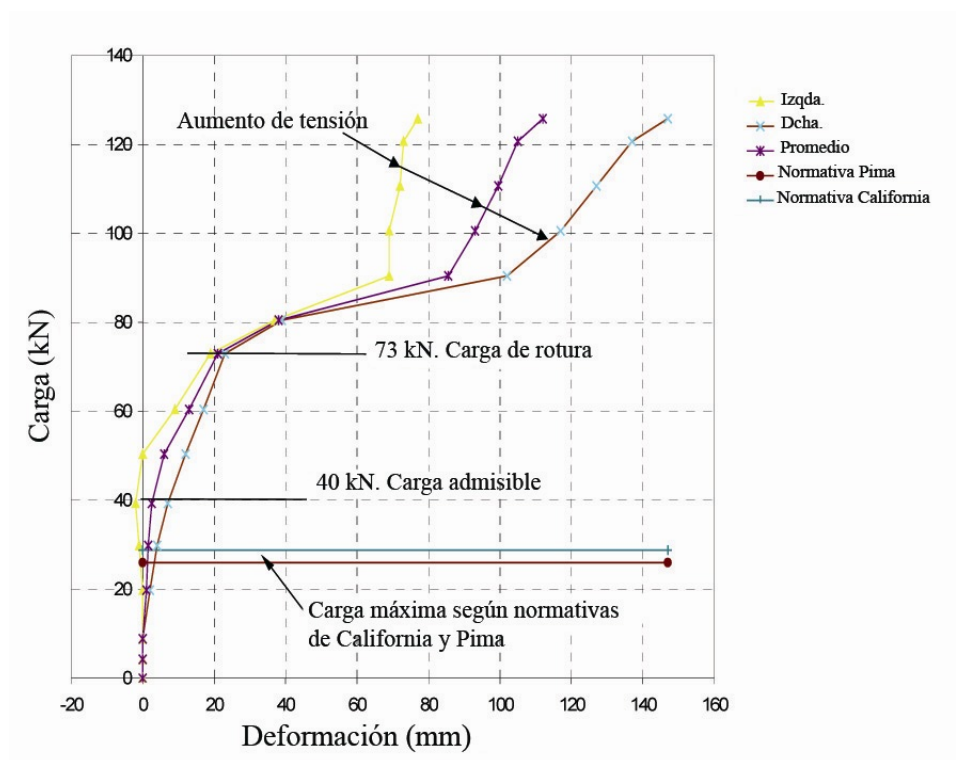


Fig. 7.46- Gráfica de carga/deformación para la pared de balas de paja

¹ CONFER – Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.

² CONFER – Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Aparte de la zona de fallo, la gráfica revela una característica importante de este material: una vez que se ha alcanzado esta carga de fallo, existe un período en el que el material sufre un asiento mayor tras el que se endurece, pudiendo volver a ser apto para soportar cargas. La primera parte de la gráfica refleja un comportamiento casi lineal, incluso con valores negativos en alguna zona de la pared, indicando que ese punto sufrió un ascenso en vez de un descenso debido a la no homogeneidad del muro.

Cuando se alcanza la carga de 70 kN se produce un significativo aumento de deformación que marca el límite admisible por el muro. Este fallo está, posiblemente, provocado por la considerable separación entre el recubrimiento y las balas de paja. Éste es el momento en el que las balas empiezan a comprimirse y después de un tiempo, cuando se hacen más compactas, experimentan una menor deformación ante las cargas. Aunque este comportamiento que se observa después del límite admisible no puede ser aprovechado, sí sirve para indicar que, en caso de exceso de carga, el muro sigue siendo seguro. En este caso, la carga última de fallo se estableció en 73 kN (48,44 kPa) y la carga de seguridad en 40 kN (26,55 kPa), lo cual indicaba un coeficiente de seguridad de 1,82¹.

La máxima tensión que un muro de balas de paja puede alcanzar depende de varios factores. La esbeltez (altura/espesor) y la relación entre distancia entre soportes y espesor del muro son los de mayor importancia. La normativa de Pima (Arizona) limita el primero en 5,6 y el segundo en 13².

A partir de los datos de los ensayos realizados se puede ver que, en lo que se refiere a carga, la cantidad que la pared pueda soportar no es el principal problema. Si los muros son de carga, como es el caso del ensayo, la carga se debe repartir en todo el área de coronación del muro. Además, este área aumenta si se colocan las balas en sentido horizontal. Un factor más limitativo quizás sea el asiento que experimenta la pared tras un proceso de carga aunque, en este caso y con una carga de **40 kN (15,4 kN/m)**, el asiento medio fue de **2,5 mm**. Una mejor, y tal vez única, forma de minimizar estos asientos en los muros de carga es realizar un proceso correcto de precompresión. Ésta carga previa a la entrada en servicio del muro es necesaria para soportar la posterior carga de servicio sin que se produzca un asiento excesivo. Además, disminuye las posibilidades de que aparezcan fisuras en la superficie del recubrimiento una vez haya entrado en carga la pared. Con la ayuda del gráfico anterior se puede entender mejor por qué esto es así.

En la fase número 1 se aplica una fuerza de magnitud “A” al muro antes de tener ejecutado el recubrimiento. En la fase número 2 ya está aplicado el recubrimiento y la letra “B” representa una carga de magnitud igual a la A (precompresión). Al tener B el mismo valor o inferior que la A, la carga de B es soportada por las balas de

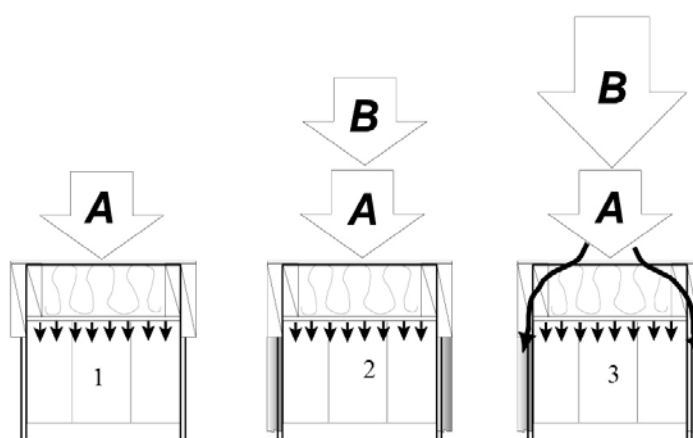


Fig. 7.47- Efecto de la precompresión en las paredes

¹ Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.

² Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

paja. En el paso 3, la letra B indica una carga superior a la fuerza ejercida en la precompresión. Esto significa que la energía activa de las balas de paja no es suficiente para absorber la carga B, de tal modo que el recubrimiento también se ve cargado con las consecuencias que esto tiene.

La previsión de fallo del muro del ensayo ante la carga apuntaba, antes de la prueba, a una rotura del recubrimiento en la pared a causa del pandeo. La realidad fue que el recubrimiento acompañó al descenso de las balas y la rotura se produjo en la parte inferior, como se puede observar en la fotografía que se ve a continuación. El comportamiento habría sido distinto si la carga se hubiese aplicado de forma directa tanto a las balas como al recubrimiento, con más roturas y a un nivel inferior de carga.



Fig. 7.48- Rotura del recubrimiento en la parte inferior

Una vez terminado el ensayo, se procedió a la demolición de la pared. Se cortaron los cables de atado que comprimían la pared y la malla de gallinero tras lo cual se procedió a la retirada del recubrimiento. En este momento, y debido al esfuerzo requerido, se pudo comprobar que la unión entre el material de recubrimiento y las balas de paja era muy resistente¹.

Aunque los autores pretenden justificar con el ensayo el buen comportamiento de una pared de dos alturas, la realidad es que esto no es tan sencillo. La altura que presenta este muro no se corresponde con la de una pared que tenga dos plantas de altura. Para ello debería tener una altura cercana a los 6 metros. Además, en este caso la separación entre soportes (los soportes metálicos) es reducida, favoreciendo los resultados. También es cierto que la ubicación de soportes no es la única forma de darle estabilidad al muro, sobre todo pensando en empujes de viento. La realización de los muros quebrados o la construcción de tramos de muros que acometan perpendicularmente a los paños largos ayuda tanto a la estabilidad del muro como a soportar los empujes horizontales. Éstos son los conceptos básicos de diseño que existían ya en Mesopotamia cuando construían con fábricas de adobes.

¹ CONFER – Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Un caso posible de fallo de un muro de estas características se puede ver en la figura 7.49.

La pared de la imagen está fallando a causa del pandeo y, si no hubiese sucedido esto, seguramente habría soportado más carga. Es fundamental un buen diseño de transmisión de cargas al muro, de forma uniforme, centrada y ejecutado de forma que se impida el giro del elemento de reparto de coronación.

En un estudio realizado en 5 tipos de muros¹ se observó que el recubrimiento que se aplica a estas paredes ayuda, de forma considerable, a reducir este efecto de pandeo. Las 4 primeras muestras eran todas sin recubrimiento, aunque todas con alguna diferencia respecto a las demás. Todas fallaron de forma similar a la que se aprecia en la imagen, menos la que tenía el recubrimiento. Esto significa que los elementos longitudinales que se insertan en la fase de construcción para mejorar la estabilidad no son tan eficaces como se piensa. Posiblemente sean más eficaces las fijaciones exteriores atadas de cara a cara. La muestra con recubrimiento al final del ensayo mostró un fallo por pandeo de mucha menor magnitud que los anteriores y a mayor carga.



Fig. 7.49- Fallo de pandeo de pared de balas de paja. [Peter Walter. Dept. Architecture & Civil Engineering, University of Bath. Compression Load Testing Straw Bale Walls (2004)]

7.5.2.3 Descripción del ensayo para paredes con distintos tipos de recubrimiento

En el año 2002, Michael Faine y John Zhang realizaron otro ensayo², pero este de dos muestras, con la intención de poder comparar los resultados. Uno se realizó igual al ya hecho 2 años antes y el otro tenía una altura de 7 balas de paja. Además, en éste no se utilizó ningún sistema de conexión de unas con otras, como en el caso anterior, y tampoco se utilizó la malla metálica en la superficie. La diferencia fundamental radica en el tipo de recubrimiento que, en este caso, era de barro.



Fig. 7.50- Operario realizando un recorte superficial de la paja. [Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.]

¹ Peter Walker, Dept. Architecture & Civil Engineering, University of Bath. Compression Load Testing Straw Bale Walls [on line]. Mayo de 2004. [Consulta: Mayo de 2004]. Disponible en web: <<http://www.strawbalebuilding.ca>>

² Michael Faine y Dr. John Zhang, University of Western Sydney, Australia. A Pilot Study examining and comparing the load bearing capacity and behaviour of an earth rendered straw bale wall to cement rendered straw bale wall [on line]. Conferencia Internacional sobre Construcción con Balas de Paja, Wagga, Diciembre de 2002. [Consulta: 17 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalebuilding.ca>>

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El recubrimiento se aplicó en tres capas, las dos primeras de entre 35 y 40 mm. de espesor total y una de acabado de entre 3 y 5 mm. La dosificación de las primeras capas era 3:3:1 (barro, arena de río y paja triturada) y la de la última capa era 3:3:1:0,6 (barro, arena, cal y paja triturada).



Fig. 7.51- Operario aplicando el recubrimiento de barro. [Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.]

El proceso de aplicación de la carga y de obtención de datos fue similar al del ensayo anterior. En la siguiente fotografía se puede ver la estructura para la transmisión de la carga en la parte superior del muro con recubrimiento de barro.



Fig. 7.52- Viga de reparto de cargas en el muro con recubrimiento de barro. [Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.]



Fig. 7.53- Toma de datos del asiento de la pared. [Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.]

7.5.2.4 Resultados del ensayo

El siguiente cuadro¹ refleja las cargas y las deformaciones verticales del muro con recubrimiento de barro:

Carga (kN)	Deformación vertical (mm)		
	Izquierda	Derecha	Promedio
0	0	0	0
9,75	2	0	1
19,28	4	0	2
29,54	6	2	4
39,16	10	3	6,5
49,04	14	5	9,5
59,65	29	16	22,5
62,93	52	36	44
68,5	62	44	53
73,38	80	58	69
73,73	90	66	78
73,58	100	79	89,5
74,81	110	105	107,5
83,44	116	135	125,5
88,41	120	154	137
86	123	175	149
88,58	125	198	161,5
99,7	121	235	178

Tabla 7.5

En estos datos se aprecia una significativa diferencia con respecto al ensayo realizado en la pared con recubrimiento de cal cemento y arena. Si nos fijamos en el dato de **39,16 kN (15,1 kN)**, vemos que tiene un descenso de **6,5 mm**, mientras que en el otro caso era de 2,5 mm. El tiempo de duración del ensayo fue inferior al del caso comparado pero, aún así, se produjo un mayor agrietamiento del recubrimiento, como se puede ver en la fotografía.



Fig. 7.54- Muro de balas de paja con recubrimiento de barro después del ensayo de compresión. [Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.]

¹ CONFER - Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.

La siguiente gráfica muestra datos comparativos interesantes de ambos ensayos.

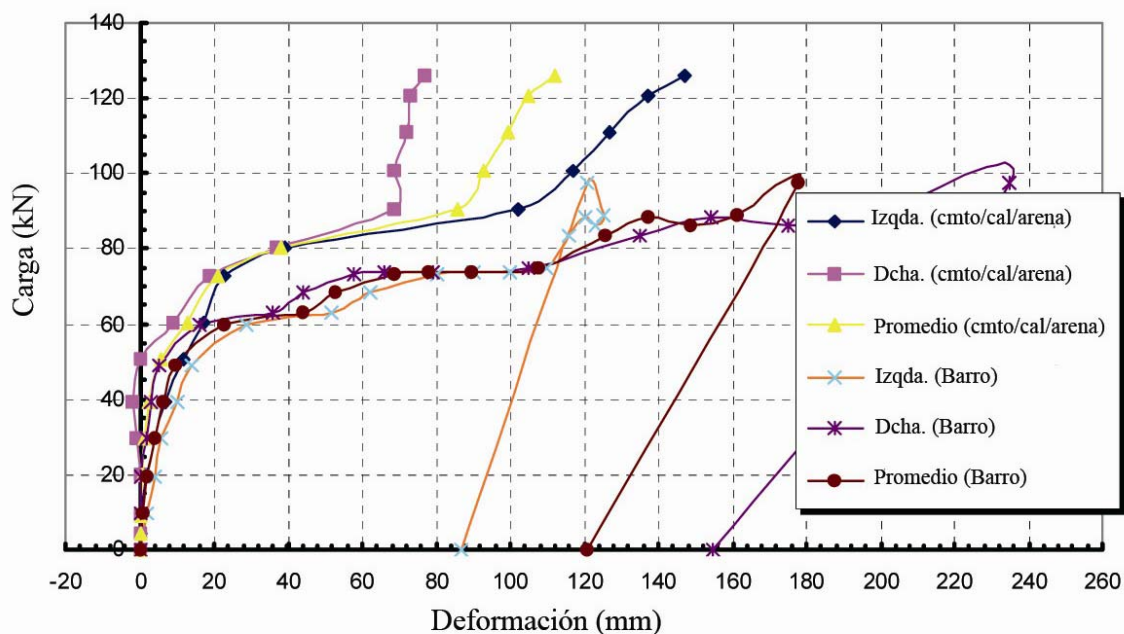


Fig. 7.55- Gráfica de carga/deformación en paredes con distinto tipo de recubrimientos [Michael Faine y Dr. John Zhang, op. cit.]

En la zona de trabajo, dentro del margen de seguridad, no se aprecia una gran diferencia en el comportamiento de ambas muestras, pero sí sucede esto a partir de la carga máxima admisible. Esto es posible que se deba a que, en el primer caso, el recubrimiento mantenía su estructura durante más tiempo y, por tanto, colaboraba en la resistencia. De todos modos, sigue siendo muy importante la forma de aplicación de la carga de cara al comportamiento del recubrimiento.

7.5.3 Limitaciones de carga y altura para las paredes

Anteriormente hemos podido estudiar el comportamiento de balas de paja, tanto con recubrimiento como sin él, ante esfuerzos de compresión. Más adelante se hablará de aspectos normativos acerca de la construcción con balas de paja, pero vamos a mencionar en este punto alguna de las limitaciones impuesta por el *California Straw Bale Code* de 1995 y lo que aún es el borrador del futuro *California Straw Bale Code*. Para empezar, la normativa californiana del año 1995 establecía una carga máxima admisible de 19 kN/m² y la modificación del año 2002 establece que la carga máxima admisible para muros de balas de paja es de 11,68 kN/m. En el borrador de la que será la futura *California Straw Bale Code* siguen manteniendo una limitación de carga aunque la establecen según el tipo de recubrimiento de la pared, como se indica a continuación:



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

CARGAS MÁXIMAS ADMISIBLES PARA MUROS DE BALAS DE PAJA			
Tipo de recubrimiento	Espesor mínimo (cm)	Malla metálica	Carga máxima admisible (kN/m)
Arcilla	3,80	No se requiere	4,38
Barro-cemento	3,80	Sí se requiere	11,68
Cal	-	Sí se requiere	6,57
Cal-cemento	-	Sí se requiere	11,68
Cemento Pórtland (*)	2,20	Sí se requiere	11,68

* Se exige un contenido mínimo de 1 parte de cal por cada 6 partes de cemento para garantizar la permeabilidad al vapor.

Tabla 7.6- Carga máxima admisible según el borrador del California Straw Bale Code [Bruce King, op. cit.]

Si suponemos un entramado horizontal formado por viguetas de 5 metros de luz y un entarimado de madera, una sobrecarga de tabiquería de 1 kN/m^2 y una sobrecarga de uso de 2 kN/m^2 , la carga que tendrían que soportar los muros en los que se apoyan las viguetas es de $9,75 \text{ kN/m}$. Si el entramado a considerar fuese de cubierta, la sobrecarga de uso se reduciría, no sería de aplicación la sobrecarga de tabiquería y habría que considerar la sobrecarga de viento, la de nieve y la de uso para conservación. Con esta consideración es posible que la carga por metro lineal se redujese hasta poder ser soportada por muros con recubrimiento de cal.

En la muestra N°4 (bala de paja sin recubrimiento y colocada en posición horizontal) del ensayo de carga en balas de paja realizado por el profesor John Zhang, pudimos comprobar como existían varias fases en la respuesta de las balas frente a la carga. La fase N°2 se podría asimilar a lo que sería el comportamiento elástico del acero, mostrando un punto de ruptura al final de esta fase. Esta ruptura se produce con un 12% de deformación y una carga de 15 kN, lo que equivale para una bala de 46 de ancho a unos **18,07 kN/m**. Teniendo en cuenta que la superficie a considerar es de 83cm por 46 cm, la tensión en este punto del proceso es de **39,3 kN/m²**. Como se puede ver, tanto el valor de la normativa de 1991 como los de la del borrador dejan suficiente margen de seguridad frente al fallo.

En la muestra N°5 (bala de paja sin recubrimiento y colocada en posición vertical), el final de la fase N°2 se produce con una deformación del 17% y una carga de 20 kN. Es evidente que esta deformación no se puede admitir en una estructura, pero si tenemos en cuenta que la superficie a considerar es de 82 cm de largo por 35 cm de ancho, la tensión que se alcanza en este momento es de **67,7 kN/m²**, cuando la normativa de 1991 no permite superar los 19 kN/m^2 . La carga a la que se ve sometida la bala de paja en ese momento es de **24,10 kN/m**, cuando el borrador de la futura norma establece para el caso del recubrimiento menos resistente un máximo de $4,38 \text{ kN/m}$.

Cuando nos pasamos a analizar las balas de paja *con recubrimiento* del ensayo comparativo, el final de esta fase se encuentra en el punto en el que el recubrimiento se empieza a agrietar. Las balas que se utilizaron tenían una densidad media de 85 kg/m^3 , densidad inferior a la recomendable, y se les aplicó recubrimientos de cal y cemento en espesores comprendidos entre los 25 y los 40 mm. El punto de ruptura para las balas colocadas en vertical se produce con una carga de **17,5 kN/m**, y para las colocadas en vertical se produce a





CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

los **43,75 kN/m**. Ambos valores son superiores a la carga máxima permitida por el borrador de la futura normativa de California.

Posteriormente, en el apartado correspondiente al ensayo de Michael Faine y John Zhang, se analizó el comportamiento ante esfuerzos de compresión de una pared de balas de paja con recubrimiento de cemento, cal y arena. Según la configuración de pared de la muestra, la carga máxima permitida por la normativa de 1995 de 19 kN/m² se alcanza cuando la carga de ensayo llega a los 22,7 kN. A este nivel de cargas, y según los datos de la tabla de valores del ensayo, la deformación de la pared **apenas supera el milímetro**, por lo que no muestra signo alguno de deterioro. Este comportamiento puede venir influido en parte por la gruesa capa de recubrimiento que tiene la pared por cada lado. Dicha capa no recibe la carga directamente pero sí indirectamente a través de la paja de las balas.

En el ensayo de carga en la pared de balas con recubrimiento de barro, la gráfica de resultados muestra unos valores de resistencia algo inferiores a los del caso que tenía recubrimiento de mortero mixto. Aún así, la diferencia se aprecia fundamentalmente cuando se alcanzan niveles muy altos de carga, niveles que no deben ser tolerados y que no están permitidos por las normativas existentes.

Como hemos visto anteriormente, la carga máxima admisible de las paredes depende en parte del tipo de recubrimiento que ésta tenga. A continuación vamos a reflejar la altura máxima que pueden tener las paredes, según el espesor y el tipo de recubrimiento, antes de superar por el peso propio la carga máxima admisible. Para ello se parte del supuesto de emplear balas de 100 kg/m³ de densidad y de dimensiones 100x35x45 cm.

ALTURA MÁXIMA POR PESO PROPIO CON BALAS COLOCADAS EN VERTICAL					
Tipo de recubrimiento	Espesor (cm)	EN VERTICAL		EN HORIZONTAL	
		Peso de la pared (kg/m ²)	Altura (m)	Peso de la pared (kg/m ²)	Altura (m)
Arcilla	4	163	2,74	173	2,58
Barro-cemento	4	195	6,11	205	5,81
Cal	2,5	115	5,82	155	5,36
Cal-cemento	2,5	125	9,52	135	8,82
Cemento Portland	2,5	135	8,82	145	8,21

Tabla 7.7

7.5.4 Resumen de los ensayos estructurales realizados

Acabamos de analizar algún ensayo concreto realizado para determinar el comportamiento de las balas de paja en un sistema estructural, pero no son los únicos que existen ni mucho menos. Este es uno de los aspectos más estudiados del sistema constructivo y a continuación vamos a enumerar una serie de ensayos que se han ido realizando desde que se ha hecho popular el sistema constructivo¹. La lista está incompleta ya

¹ CONFER – Bruce King. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7





CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

que existen algunos realizados en Dinamarca, Alemania, Holanda o Austria para los que no existe traducción a otros idiomas.

1. Bou-Ali, 1993

Bou-Ali, Ghailene, 1993. *Straw Bales and Straw-Bale Wall Systems*. University of Arizona, Tucson

2. Thompson et. al. 1995

Watts, K., K. Wilkie, K. Thompson y J. Corson, 1995. *Thermal and Mechanical Properties of Straw Bales As They Relate to a Straw House*. Canadian Society of Agricultural Engineering, Ottawa, Ontario.

3. Platts, Chapman, 1996

Platts, Bob and Linda Chapman, 1996. *Developing and Proof-Testing the "Prestressed Nebraska" Method for improved Production of Baled Fibre Housing*. Canada Mortgage and Housing Corporation.

4. Carrick, Glassford, 1998

Carrick, John, and John Glassford, 1998. *Vertical Loading Creep, Transverse Loading, and Racking Loading on Plastered Straw-Bale Walls*. University of New South Wales, Australia.

5. Ruppert, Grandsaetz, 1999

Ruppert, Jeff, and Matt Grandsaert, 1999. *A Compression Test of Plastered Straw-Bale Walls*. University of Colorado, Boulder, Colorado.

6. Stephens, Budinger, 2000

Stephens, Don, and Budinger & Associates, Inc. 2000. Laboratory test Spokane, Washington.

7. Faine, Zhang, 2000

Faine, Michael, and John Zhang, 2000. *A Pilot Study Examining The Strength, Compressibility and Serviceability of Rendered Straw Bale Walls for Two Storey Load Bearing Construction*. University of Western Sydney, Australia.

8. Zhang, 2002

Zhang, John, 2000. *Load-Carrying Characteristics of a Single Straw Bale Under Compression*. University of Western Sydney, Australia.

9. Blum, 2002

Blum, Brandice, y Kris Dick, 2002. *Load Carrying Behaviour of On Edge Straw Bale Walls*. University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.

10. Zhang, 2002

Zhang, John, 2000. *Load-Carrying Characteristics of a Single Straw Bale Under Compression*. University of Western Sydney, Australia.

11. Faine, Zhang, 2002

Faine, Michael, and John Zhang, 2002. *A Pilot Study Examining and Comparing The Load Bearing Capacity and Behaviour of an Earth Rendered Straw Bale Wall to Cement Rendered Straw Bale Wall*. University of Western Sydney, Australia.

12. Dreger, 2002

Dreger, Derek, and Kris Dick, 2002. *Compression Resistance of a Stuccoed Straw Bale Wall*. University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.





CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

13. Mar, 2003

Mar, David, 2003. *Bearing Test of Plastered Straw Bales*. Ecological Building Network, Sausalito, California.

14. Vardy, 2004

Vardy, Stephen and Colin MacDougall, 2004. *Compressive Testing of Plastered Straw Bales and Straw Bale Plasters*. Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

15. Walker, 2004

Walker, Peter, 2004. *Compression Load Testing Straw Bale Walls*. University of Bath, Bath, United Kingdom

16. Faine, Zhang, 2005

Faine, Michael, and John Zhang, 2005. *Preliminary Discussion of Bale on Edge on Edge Wall Test*. University of Western Sydney, Australia.

7.5.5 Comentarios sobre los ensayos

Merecen especial atención algunos de los comentarios realizados por los autores de un ensayo, Stephen Vardy y Colin MacDougall (2004).

- Influencia de la orientación de las balas

En igualdad de condiciones, las balas colocadas en vertical y con recubrimiento por los laterales poseen una tensión de rotura inferior a la que puedan tener las colocadas en horizontal. Las colocadas en vertical, con un recubrimiento de 12,7 mm y una tensión de rotura del recubrimiento de 1,71 MPa tienen una tensión de rotura de aproximadamente 25 kN/m mientras que las colocadas en horizontal tienen aproximadamente 35 kN/m. La razón de esta diferencia se estima que está en la mejor adhesión entre las fibras y el recubrimiento en la posición horizontal.

- Influencia del espesor del recubrimiento

Las balas de paja colocadas en horizontal con un recubrimiento de 38,1 mm de espesor tienen una tensión de rotura en torno a los 72 kN/m mientras que las que tienen un recubrimiento de 25,4 mm tienen una tensión de rotura de unos 58 kN/m. Las que tienen un recubrimiento de 12,7 mm poseen aproximadamente una tensión última de rotura de 32 kN/m. Doblando el espesor del recubrimiento de 12,7 mm a 25,4 mm se aumenta la resistencia 1,8 veces, y triplicando el espesor se aumenta 2,25 veces. El incremento de resistencia no sigue la misma proporción que el del espesor. La razón puede ser que las capas más gruesas de recubrimiento tienen gran cantidad de material que no está directamente en contacto con la paja.



7.6 Resistencia al viento

7.6.1 Introducción

La presión del viento es la más común de las acciones que actúan en una pared en perpendicular a su plano. Dicha presión puede causar problemas a las estructuras en su conjunto. Con menos probabilidad le afecta exclusivamente a las paredes, a no ser que éstas sean muy altas o estén fijadas deficientemente. La presión causada por el viento es algo sencillo, que varía y cambia de dirección y sentido con la localización y con el tiempo, y se suele simplificar asimilándola a una presión uniforme (presión o succión) aplicada en la pared o en la cubierta.

En el caso de paredes de balas de paja con recubrimiento, se ha demostrado que las cargas de viento no son problemáticas. En al menos dos ocasiones, paredes de balas de paja sin recubrimiento han resistido vientos huracanados sin peligro de derrumbe.

7.6.2 Propiedades físicas

Tanto los primeros ensayos de carga perpendicular al muro como los más recientes empezaron con la aparición de una grieta en el recubrimiento de la cara tensionada y a media altura. Esto puede indicar que las paredes tienen un comportamiento de flexión. Esta conclusión es correcta pero sólo hasta el momento en el que aparece esa primera grieta horizontal. En este momento, y al igual que sucede en una viga, el comportamiento de la pared cambia sustancialmente. El modelo deformado de la sección muestra que el comportamiento de esfuerzos cortantes predomina frente a la flexión.

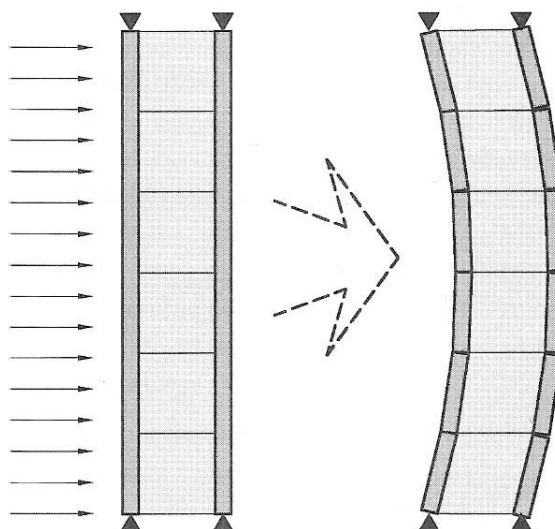


Fig. 7.56- Gráfica deformada de la pared ante acciones de viento [Bruce King con Kevin Donahue, op.cit.]

Cuando se aplica la carga en dirección perpendicular al plano de la pared, las balas de paja se deforman pasando de rectángulos a paralelogramos, provocando la aparición de grietas a lo largo de las juntas horizontales. En este momento, la carga pasa a ser resistida en gran parte por las dos capas de recubrimiento, actuando como amplias y estrechas vigas, no muy resistente, pero de cualquier modo sí más que el ensamble estructural global¹.

¹ Bruce King con Kevin Donahue. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

7.6.3 Descripción de los ensayos

Kevin Donahue dirigió varios ensayos con la intención de estudiar el comportamiento y establecer una metodología de diseño. Todos estos ensayos fueron realizados en muestras de unos 2,4 metros de altura, y ninguno dio muestras de fallo hasta que se superaron ampliamente las cargas de servicio.

En el primer ensayo¹, una pared de 2,3 metros de altura formada por balas de paja y con un recubrimiento de 5 cm de barro por cada cara. Cada una de las capas de recubrimiento fue armada con una malla metálica.

Una vez que la pared estaba totalmente terminada, se empezó a girar lentamente hasta que alcanzara la posición horizontal, posición en la que soportaba el 100% de su peso y mostrando una flecha de 14 mm. Posteriormente se incrementó sustancialmente la carga colocando sobre la pared un recipiente al que se fue añadiendo agua.

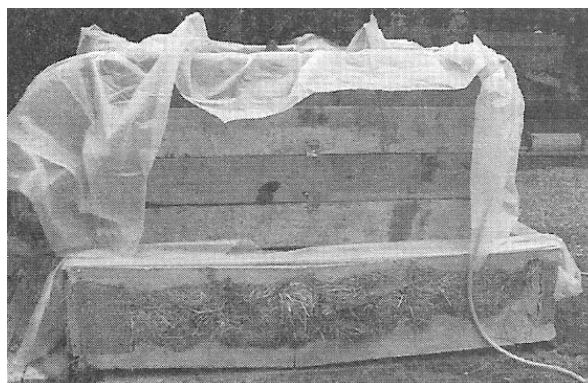


Fig. 7.57- Muestra del ensayo con el recipiente para el agua [Bruce King con Kevin Donahue, op. cit.]

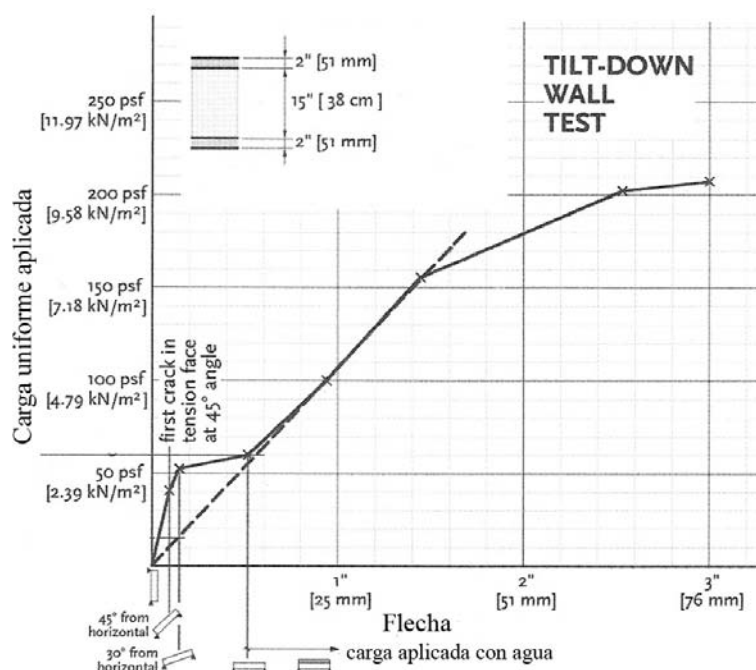


Fig. 7.58- Gráfica de carga/deformación para la pared ensayada [Bruce King con Kevin Donahue, op.cit.]

La línea de trazo discontinuo representa el comportamiento de una pared siguiendo la deformación pura del cortante según la fórmula:

$$\Delta = wH^2 / 8G_c A_c$$

W = carga uniforme de viento.

H = altura de la muestra

G_c = resistencia a cortante dada por la fórmula: $G_c = E_c / (2(1+\nu))$ en el que ν es el módulo de Poisson, que para las balas ha sido determinado en 0,35

A_c = Área del núcleo de paja

Para más información se puede consultar dicho ensayo.

¹ Kevin Donahue y David Arkin. Preliminary report on out-of-plane testing of fan 8 foot by 8 foot straw bale/pisé wall panel. Año 2001

7.6.4 Comportamiento de la pared antes del agrietamiento

Un análisis completo de cualquier viga requiere comprobar tanto el comportamiento frente a esfuerzos cortantes como a esfuerzos flectores. En la mayor parte de los casos, excepto en el caso de vigas de poca longitud y elevadas cargas, el cortante tiene una importancia reducida, por lo que se comprueba únicamente frente a esfuerzos flectores. En las paredes de balas de paja la situación es diferente. Las balas, que son relativamente blandas, se deforman ante la carga pasando de rectángulos a paralelogramos dentro de la pared, mientras que la sección completa del recubrimiento trata de mantenerse rectangular. El cortante es, con diferencia, el esfuerzo predominante en el comportamiento de la pared de balas de paja con recubrimiento¹.

En el ensayo antes mencionado, la primera grieta apareció en la cara traccionada, cuando la pared había alcanzado los 45° con respecto a la horizontal. Esto equivale a una carga uniformemente repartida de 2kN/m² sobre la pared, mostrando una flecha de 2 mm. Hasta este punto, los recubrimientos de ambos lados intentan actuar como finas vigas para resistir la carga.

Para una muestra de 1 metro de ancho y 2,30 metros de largo el momento máximo antes de producirse el agrietamiento es:

$$M = PL^2/8 = 2\text{kN/m} \times 5,29\text{m}^2 / 8 = \underline{1,32 \text{ kN} \times \text{m}}$$

La grieta que se produce ante la carga es amplia en la parte exterior y estrecha o nula en la parte interna de la pared. Esto indica que el recubrimiento está intentando trabajar como una viga de muy poco canto y rápidamente alcanza la carga de rotura. La pared ha creado un punto que hace cambiar su comportamiento, predominantemente flector, a una compleja combinación de cortante en las balas y tracción/compresión/flexión en el recubrimiento. En este momento, la malla metálica de refuerzo del recubrimiento comienza a trabajar como lo haría la armadura de acero de una viga si ésta comenzase a agrietarse.



Fig. 7.59- Comienzo de agrietamiento en la cara traccionada [Bruce King con Kevin Donahue, op.cit.]

¹ CONFER – Bruce King con Kevin Donahue, op. cit.

7.6.5 Comportamiento de la pared después del agrietamiento

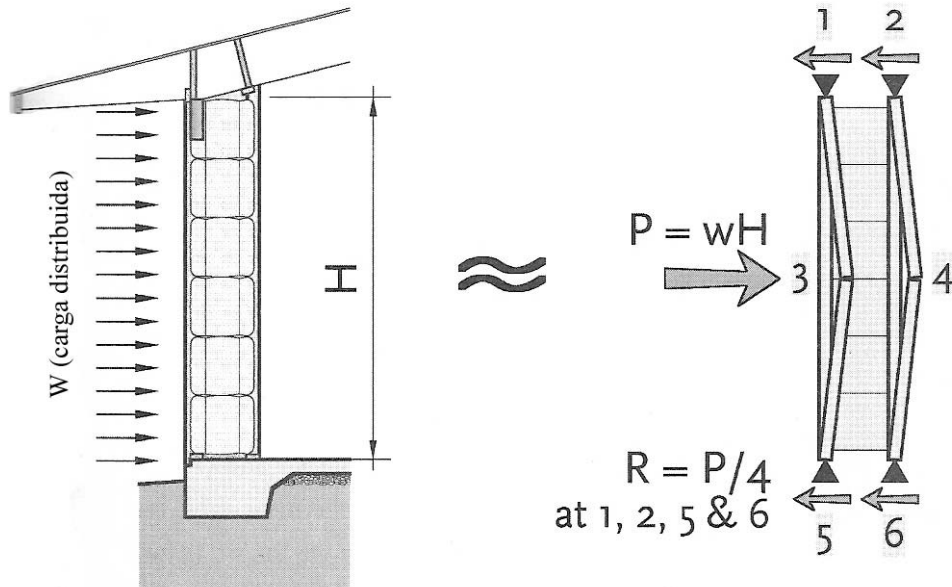


Fig. 7.60- Esquema simplificado del comportamiento de la pared ante esfuerzos de viento [Bruce King con Kevin Donahue, op.cit.]

Kevin Donahue hizo un modelo de la sección de la pared como el que aparece en la figura anterior, a partir de la cual analizó y propuso una metodología para analizar varios aspectos de este tipo de paredes. Para la comprobación del comportamiento utilizó un diseño de una muestra como la del ensayo, de 30 cm de ancho y 2,4 metros de largo, a la que le supuso una carga repartida de 4,79 kN/m².

Aspectos analizados:

A. Fijaciones en los puntos 2 y 6.

En estas zonas no se observó ningún indicio de fallo a este nivel de carga durante los ensayos.

B. Cortante en los puntos 1 y 5.

El valor del esfuerzo cortante en este punto resultó ser muy inferior al máximo soportable por el tipo de recubrimiento.

C. Flexión del recubrimiento en los puntos 1,2,5 y 6.

Este dato se mostró muy reducido, cumpliendo ampliamente con las exigencias del material.

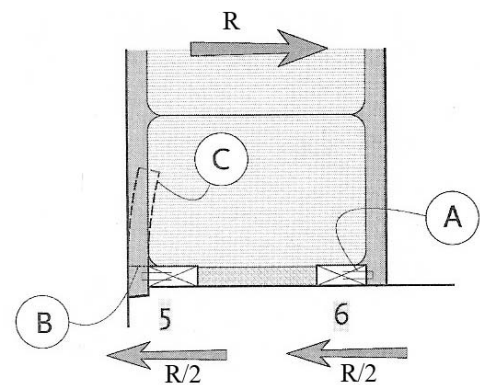


Fig. 7.61- Esquema de fuerzas en la base de la pared [Bruce King con Kevin Donahue, op. cit.]

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

D. Tensión en las balas de paja.

Cada bala de paja de una pared sometida a fuerzas actuantes en sentido perpendicular al plano de la pared se deforma como se puede observar en la siguiente figura. En la propia bala se generan una compresión y una tracción para resistir o intentar resistir la deformación causada por la tensión tangencial. Según los cálculos de David Mar¹, las solicitaciones de tracción y compresión generadas en las balas de paja son incapaces de ser contrarrestadas por el propio material embalado.

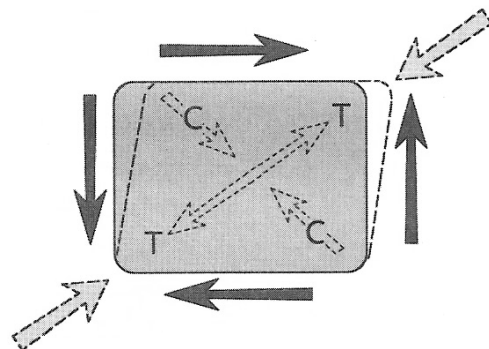


Fig. 7.62- Distorsión producida en las balas [Bruce King con Kevin Donahue, op. cit.]

La tensión interna de una bala de paja es función de la longitud de las fibras, y el grado en el que estén trabadas unas con otras

determina la resistencia de la bala. Siendo así, incrementando la trabazón entre fibras se aumentaría la capacidad interna del material para soportar las distorsiones causadas por los esfuerzos tangenciales.

En el diagrama de deformación de la pared ensayada, la pared había mostrado, al nivel de carga estudiado, una flecha de 24 mm, por lo que se sabe que las balas se han deformado. Esto significa que la distorsión de la bala debe ser resistida por las reacciones diagonales del recubrimiento, en combinación con cualquier resistencia a tracción que las balas tengan.

Los recubrimientos están manteniendo la unidad del conjunto, y el cortante fluye de las balas al recubrimiento, y de este a las balas y así continuamente. Esta zona de carga es en las esquinas de las balas, lo que explica las grietas horizontales que han aparecido en todos los ensayos realizados hasta la fecha.

Este estudio se plantea la necesidad de utilizar algún tipo de unión entre las mallas metálicas al nivel de cada hilera. Esta atadura soportaría en teoría la tensión, liberando tanto a la bala como al recubrimiento de esta función.

El diagrama también muestra la existencia de una fuerte adhesión entre las fibras y el recubrimiento. En el estudio realizado, David Mar determina que la solicitación en esta zona, y al nivel de carga estudiado, es de 15 kN/m². Son muchos los informes realizados que califican la unión entre las fibras y el recubrimiento como de muy difícil de separar.

E. Resistencia a la separación entre el recubrimiento y las fibras en los puntos 1 y 5.

En todos los ensayos realizados no se ha detectado ningún problema en este aspecto. Esta resistencia depende de estos factores:

- La longitud de las fibras (cuanto más largas mejor)
- El número de fibras por unidad de superficie que se traben lo suficiente con el recubrimiento
- El número de estas mismas fibras que traben lo suficiente con la bala

Esto refuerza la necesidad de utilizar balas de paja con las fibras largas y la necesidad de aplicar la primera capa de recubrimiento de forma que se adhiera de forma eficaz a la paja.

¹ David Mar. Full scale straw-bale vault test. Berkeley, California. 1998

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

F. Resistencia de la malla metálica en el punto 4.

La malla demostró cumplir con las exigencias en estos puntos.

G. Resistencia a compresión del recubrimiento en el punto 3.

El recubrimiento presentaba valores de resistencia a compresión superiores a los exigidos en dicha zona.

7.6.6 Comentarios del ensayo

En el ejemplo anterior se analizó una pared casi exactamente igual a la del ensayo del que se mostró la gráfica de deformación. La diferencia está en que la muestra tenía una altura de 2,30 metros y la utilizada para el cálculo teórico era de 2,40 metros. De mayor importancia es el dato del valor de la carga aplicada, que para los cálculos se determinó en 4,8 kN/m², un valor muy superior al que pueda ser exigido ante esfuerzos de viento en cualquier parte del mundo¹.

7.6.7 Limitaciones de altura de las paredes

Para realizar los cálculos de los esfuerzos de viento que pueden soportar las paredes de balas de paja nos vamos a apoyar en los resultados del ensayo de Kevin Donahue que acabamos de analizar. Los cálculos se realizarán tomando una muestra representativa de un metro de ancho de pared, y para facilitar los cálculos se va a hacer la siguiente simplificación que aparece en la figura 7.63.

El espesor e_1 es proporcional a la relación entre la rigidez del recubrimiento y del núcleo de paja, y por tanto

entre los módulos de Young (E) de ambos materiales. Por lo tanto, $e_1 = b \frac{E(paja)}{E(rec.)}$.

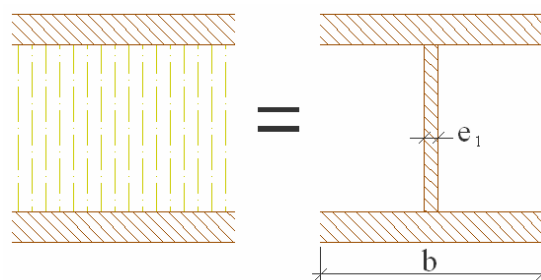


Fig. 7.63- Sección transformada de una sección horizontal o vertical de una pared de balas de paja con recubrimiento [Bruce King, op. cit.]

Según Bruce King, esta es la simplificación que se utiliza para realizar los cálculos desde que en 1996 se empezaron a utilizar modelos para simular el comportamiento de las paredes de balas de paja. Mediante este procedimiento se asimila el comportamiento a flexión de un tramo representativo de una pared de balas de paja a un elemento en doble T, todo del material del recubrimiento. De este modo, y teniendo en cuenta los momentos de inercia y los niveles de tensión a los que se produce la ruptura del material, se puede determinar el momento máximo que puede soportar una pared antes de el recubrimiento comience a agrietarse.

Tanto en el caso en que las balas se estudian en posición horizontal como en el de ellas en vertical, el módulo de Young (E) se ha tomado del de las balas colocadas en vertical, que es el más conservador y también el más real. De este modo, tenemos en cuenta el momento en el que el recubrimiento alcanza la

¹ CONFER – Bruce King y Kevin Donahue, op. cit.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

carga en la que se empieza a romper. En el otro caso, el módulo de Young es muy superior a causa de la colaboración de las fibras de paja. El módulo de Young a utilizar en este caso para el recubrimiento es de 243.125 kPa mientras que para las balas de paja, y según un ensayo realizado por Bou-Ali en 1993, se puede cifrar en 800 kPa. Con estos datos, el espesor equivalente del núcleo de paja sería de 0,003 metros para un tramo representativo de un metro.

Acabamos de analizar los datos del ensayo de carga perpendicular al plano de una pared que simula los esfuerzos de viento a los que puede estar sometido. El autor del ensayo hizo los cálculos de comprobación para un nivel de carga de 4,79 kN/m² (488 kg/m²), punto en el que la pared experimentó una flecha de 23mm. Según los datos del ensayo, a este nivel de carga la pared experimentó una flecha de 23 mm., pero el conjunto de la pared no mostró indicios de colapso. Si suponemos un tramo representativo de 1 metro de ancho, el momento flector máximo que está soportando la pared es de **3,45 kN x m** (351,36 kg x m). Si aplicamos la fórmula $\rho = M y / I$, entonces $\rho = 49,4 \text{ kN/m}^2$ (5.037 kg/m²).

ρ = tensión (trac./comp) en el punto estudiado (kg/m²)

M= Momento flector máximo de la sección estudiada (kg x m)

y= distancia del punto del que se estudia la tensión respecto al centro de gravedad de la sección. En este caso y= espesor muro/2 (m).

I= Inercia de la sección (m⁴)

Este valor de tensión es el que indica la tensión que soporta el recubrimiento al nivel de carga y de deformación mencionado. No se afecta de un coeficiente de seguridad porque el ensayo indica que a partir de este nivel de carga aún existe margen de seguridad frente al colapso.

Los cálculos de la resistencia al viento se van a realizar planteándose dos situaciones distintas: una con balas colocadas en horizontal (45 cm. de espesor) y otra con ellas colocadas en vertical (35 cm. de espesor). En ambos casos se le considera un recubrimiento de mortero mixto como el utilizado en el ensayo de compresión y con un espesor medio de 25 mm. por cada lado.

Según los datos del ensayo de resistencia al viento, y **ajustándonos a la configuración planteada**, nos encontramos con los siguientes datos:

Disposición de las balas	Espesor de las balas (m)	Momento de inercia (I) (m ⁴)	Distancia máxima respecto al eje (y) (m)
En vertical	0,35	0,001907	0,20
En horizontal	0,45	0,0285	0,25

Tabla 7.8- Datos a utilizar para el cálculo de resistencia a esfuerzos de viento

Con estos valores aplicados en la fórmula $\rho = M y / I$, las conclusiones resultantes del cálculo son las siguientes:

- El momento flector máximo que puede soportar una pared con balas colocadas en vertical antes de que el recubrimiento que hemos estudiado se empiece a agrietar es de **0,44 kN x m** (**44,58 kg x m**).

Si suponemos una pared de este tipo colocada en Santiago de Compostela, la carga de viento que debe soportar es de 0,62 kN/m² (63 kg/m²). Con esta carga de viento, el momento flector de 0,44 kN x m se alcanzaría con una altura de pared de **2,38 metros**. Este valor supera la esbeltez máxima permitida por el





CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

California Straw Bale Code 2002 (CSBC-02) que permite una esbeltez máxima 5,6/1. Con un ancho de pared de 40 cm. como el que tenemos, esta esbeltez se alcanzaría con 2,24 metros de altura. El borrador del futuro *CSBC* limita la esbeltez a 6/1, lo que permitiría una altura máxima de 2,40 metros.

- El momento flector máximo que puede soportar una pared con balas colocadas en horizontal antes de que el recubrimiento se empiece a agrietar es de **0,69 kN x m (70,52 kg x m)**.

Si suponemos una pared de este tipo colocada en Santiago de Compostela, y con la carga de viento de $0,62 \text{ kN/m}^2$, el momento flector de $0,69 \text{ kN x m}$ se alcanzaría con una altura de pared de **3,00 metros**. Este valor supera la esbeltez máxima de 5,6/1 de la *CSBC-02*. Con un ancho de pared de 50 cm. como el que tenemos, esta esbeltez se alcanzaría con 2,80 metros de altura. El borrador del futuro *CSBC* limita la esbeltez a 6/1, lo que permitiría una altura máxima de 3,00 metros.

Observamos que el grado de resistencia a esfuerzos de viento depende en gran medida de la inercia de la pared, o lo que es lo mismo, de la colocación de las balas de paja. También influye decisivamente el espesor del recubrimiento y su resistencia a compresión. El factor fundamental en el caso del ensayo analizado ha sido la colocación de una malla metálica en el recubrimiento. Ésta aporta la resistencia que el recubrimiento no tiene en la cara traccionada.

Hemos visto que el *CSBC-02* limita la esbeltez a una proporción 5,6/1 y que el borrador del *CSBC-02* lo hace a 6/1. La esbeltez 6/1 la permite cuando las paredes deben soportar acciones perpendiculares a su plano y cuando cuentan con refuerzo de malla metálica en el recubrimiento. También permite esta esbeltez cuando las paredes sin refuerzo en el recubrimiento o sin recubrimiento cuentan con elementos longitudinales de conexión interna o externa. La exigencia para los elementos de conexión interna es que sean continuos o que se solapen en cada hilada, que tengan un diámetro mínimo de 13 mm y que estén espaciados un máximo de 61 mm. Es muy posible que el coste de materiales y de mano de obra para ejecutar esto no compense el prescindir de la malla metálica. Por otro lado, en paredes con recubrimiento pero sin refuerzo alguno, la esbeltez la limita a 4/1, razón por la que no es frecuente realizar recubrimientos sin refuerzo.



7.7 Resistencia a los tornados

7.7.1 Descripción del ensayo

En el año 1999, en Texas, se realizó un ensayo de resistencia a los tornados para comprobar el comportamiento de estas paredes. La proliferación de estas construcciones en Europa y Asia, pero sobre todo en el centro y suroeste de los EEUU, ha motivado en parte este estudio. El ensayo consistía básicamente en hacer impactar un listón de madera de 6,8 kg y de sección 5x10 cm en sentido perpendicular a una pared. Esta pieza se lanzó a una velocidad de 161 km/h que corresponde con una velocidad del viento de 402,25 km/h. En el 99% de los tornados que han sucedido en EEUU, la velocidad del viento no superó los 400 km/h y en el 90% de los mismos fue inferior a 160,35 km/h¹.



Fig. 7.64- Pared sometida a ensayo

El muro ensayado es el que aparece en la fotografía y está formado por balas de paja de 36 x 60 x 122 cm. con un peso aproximado de 29 kg. (110 kg/m³). La primera fila de balas estaba asentada en una base que tenía barras de acero soldadas por un extremo a esta base, para garantizar la fijación de la pared a la base. Una vez colocadas todas las hiladas de balas, por la parte superior se insertaron otras barras que atravesaron todas las hiladas para un mejor comportamiento.

El paso siguiente fue la aplicación del recubrimiento, por ambas caras, sobre una malla metálica que se ató a unos listones de madera. En cada cara había 3 listones y cada uno de estos estaba atado con el que tenía enfrente en el lado opuesto. El recubrimiento estaba formado por 18 partes de arena, 3 partes de cemento y una parte de fibras de poliéster y se aplicó en tres capas con un espesor total aproximado de 7 cm. y la última no tenía las fibras.

¹ Joseph J. Bilello y Russell R. Carter. Investigation of wind-borne debris resistance of straw bale wall construction with a stucco finish [on line]. The Wind Engineering Research Center, Texas Tech University, Marzo de 1999. [Consulta: 9 Agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalebuilding.ca>>

7.7.2 Reportaje fotográfico de las fases del ensayo

Impacto N° 1 (100 km/h)



Fig. 7.65

El listón penetró en la pared 33 cm.



Fig. 7.66

El impacto provocó un pequeño agrietamiento en la cara posterior

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Impacto N° 2 (115 km/h)



Fig. 7.67 El listón penetró en la pared 53 cm.



Fig. 7.68 El impacto causó un agrietamiento mayor que el anterior en la cara opuesta

Impacto N° 3 (135 km/h)



Fig. 7.69

El listón sobresalió por la parte posterior 38 cm.



Fig. 7.70

Se desprendieron grandes trozos del recubrimiento de la parte posterior

Impacto N° 4 (161 km/h)



Fig. 7.71

El listón atravesó la totalidad del muro pero sin romper la malla metálica.



Fig. 7.72

Se desprendieron trozos de recubrimiento de la parte posterior pero sin daño en la malla.

Impacto N°5 (145 km/h)



Fig. 7.73

El listón atravesó totalmente la pared.



Fig. 7.74

No se desprendió el recubrimiento salvo en la zona de paso del listón.

7.8 Resistencia sísmica

7.8.1 Comportamiento general

En principio, parece que la construcción con fardos de paja puede ser de especial importancia en lugares de fuerte actividad sísmica (con ciertas limitaciones). Las balas de paja se refuerzan fácilmente con madera, barras de acero o alambres o se atan con cintas plásticas desde la base hasta la coronación para evitar que las piezas trabajen de forma individual, sobre todo ante esfuerzos horizontales.

La naturaleza de la paja, su flexibilidad y resistencia, la hacen ideal para zonas sísmicas, siempre que las conexiones entre el sistema del muro, los cimientos y la cubierta sean adecuadas. Estos muros pueden absorber gran parte de la energía sísmica para no transmitirla a la cubierta. Los enfoscados que se suelen utilizar en estos muros (de unos 4 cm. y reforzados con mallas metálicas) colaboran en este sentido.

La figura de la derecha representa, de forma muy simplificada, los empujes horizontales que puede llegar a provocar en una construcción el viento o un terremoto. En este esquema se ve cómo los muros que están paralelos a la dirección de las fuerzas soportan los esfuerzos.

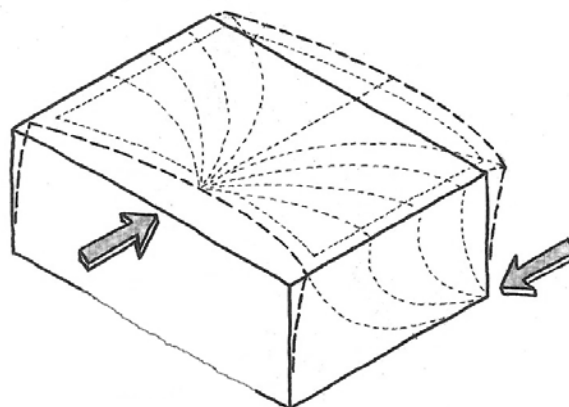


Fig. 7.75- Deformación del conjunto ante esfuerzos [Bruce King con Kevin Donahue, op. cit]

Para que un muro de este tipo tenga un buen comportamiento sísmico es fundamental conseguir que éste sea un todo uno, es decir, que todos los elementos estén unidos entre sí y de forma eficaz. Si no es así, o si la intensidad sísmica es elevada, se pueden producir deterioros en la estructura que pueden tener difícil solución o incluso provocar la ruina.

Existen estudios acerca de ensayos realizados en paredes de balas de paja con recubrimientos y refuerzo de malla metálica que demuestran las buenas cualidades para soportar acciones sísmicas. Incluso las paredes con un recubrimiento de barro y refuerzo de mallas plásticas mostraron buenas características. Los equipos utilizados para el estudio limitaban el desplazamiento en coronación a ± 18 cm sin que las paredes mostrasen indicios de haber alcanzado el colapso¹.

7.8.2 Introducción al ensayo

Una pared de balas de paja es un conjunto de elementos que trabajan juntos para resistir acciones gravitatorias y acciones horizontales. Una de las principales características que debe tener un diseño resistente a los terremotos es proporcionar un mecanismo elástico de resistencia a fuerzas horizontales en el

¹ CONFER - Bruce King with Kevin Donahue. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

plano de la pared¹. Como las fuerzas se transmiten a través de elementos individuales, la previsión de elasticidad requiere que a los elementos frágiles (el recubrimiento) sean fijados suficientemente fuerte como para asegurar que el comportamiento elástico se desarrolla en los elementos capaces de tener esta respuesta. El dibujo que aparece más abajo representa el concepto del flujo de fuerzas en una pared de balas de paja. En éste, las fuerzas laterales aplicadas en la coronación de la pared son contrarrestadas por unos esfuerzos internos, compuestos por una compresión diagonal en el recubrimiento y en las balas y una tracción en la otra diagonal en el recubrimiento. Esta última es soportada por la malla metálica o por los cables, aunque en el caso de los cables sólo soporta la componente vertical. En esta figura, la elasticidad se consigue por la tracción de la malla en tensión o por la deformación de las balas de paja en compresión.

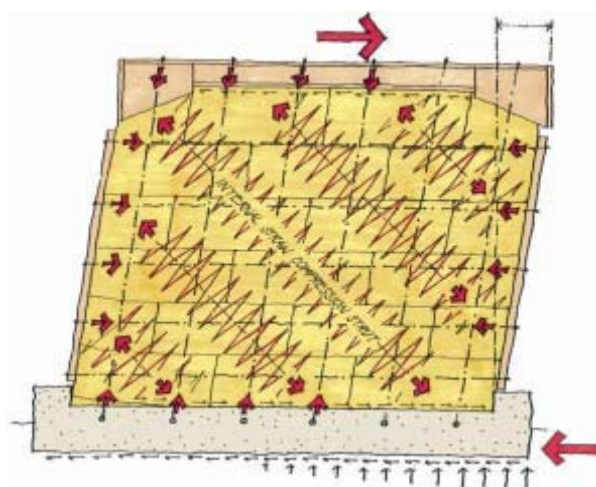


Fig. 7.76- Comportamiento de un muro ante esfuerzos horizontales en coronación. [Cale Ash y Mark Ashhlein, op. cit.]

Es evidente que el recubrimiento de las superficies es mucho más rígido que las balas de paja y, por esto, si las fuerzas aplicadas a las balas provocan un movimiento del muro, las superficies de éste se degradarán significativamente. Antes de que se produzca esta degradación se debe desarrollar una tensión en cada lado del muro, tensión que se irá redistribuyendo según se vaya agrietando. El desarrollo de una compresión en las balas requiere que el recubrimiento quede dañado o que se desprenda, mientras se mantiene íntegro el refuerzo y las conexiones en la coronación y en la base.

7.8.3 Descripción del ensayo

Mark Ashheim y Cale Ash, de la Universidad de Illinois, estudiaron el comportamiento de 6 paredes de balas de paja sometidas a esfuerzos cíclicos en la coronación, que simulan los producidos por un seísmo. Tres de las muestras tenían un recubrimiento de cal y cemento, mientras que las otras tres lo tenían de barro. En la coronación y en la base se colocó, de forma doble, la malla metálica para evitar un fallo en la transmisión de carga en estas zonas. Además, se colocaron conectores para reforzar esta adherencia.

Las muestras se construyeron todas con 6 filas en altura de balas de paja. Se utilizaron dos tipos de recubrimiento (el de barro y el de cemento y cal) y tres tipos de refuerzo (el ligero, el intermedio y el

¹ CONFER – Cale Ash y Mark Ashhlein. In-Plane Cyclic Test of Plastered Straw Bale Wall Assemblies [on line]. University of Illinois. Disponible en web: <<http://www.strawbalebuilding.ca>>

CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

elevado). Algunas formas de refuerzo son sencillas, como es el caso de un atado desde la base a la coronación con cables. Otras, como la confinación de filas de balas de paja, son más complejas.

El proceso de construcción de las muestras empezó con la ejecución de una estructura de base en la que poder apoyar las balas y a la que poder fijar los elementos de atado. Esta base fue más compleja en el caso de las muestras C y F (las de mayor refuerzo), que requerían la fijación de la primera fila de balas con unos anclajes metálicos.

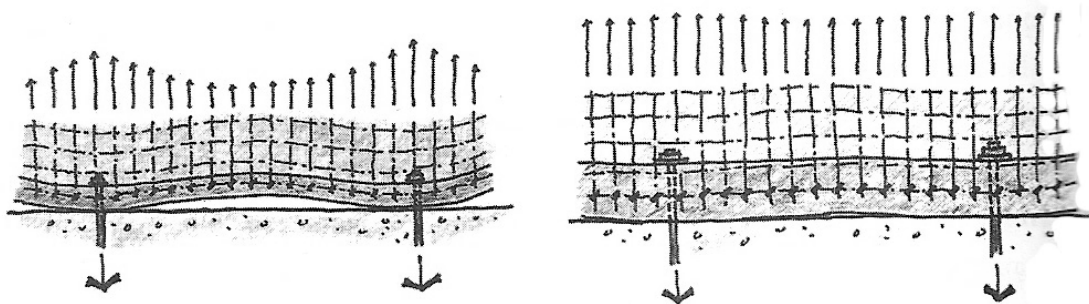


Fig. 7.77- Formas de fijación de la malla metálica en la base del muro [Bruce King con Kevin Donahue, op.cit.]

Cuando se diseña un muro de este tipo en una zona de elevado riesgo sísmico, los elementos a los que se fijen las mallas metálicas deben ser lo suficientemente gruesos como para resistir la flexión¹.

Una vez que se colocaron todas las balas de la pared, se realizó la viga de coronación. Ésta tenía unos conectores que trataban de asegurar la transmisión de la carga a las balas. Antes de colocar las mallas metálicas se le aplicó a las muestras una carga que representa la de la cubierta o la de la estructura de un piso superior. El siguiente paso fue la aplicación de los recubrimientos en varias capas y respetando los tiempos de secado.

Todas estas muestras fueron construidas y ensayadas en el *High Bay structures testing facility* en los *United States Army Construction Engineering Research Laboratory* en Champaign, Illinois.

Materiales utilizados:

Las balas de paja que se utilizaron eran de dimensiones 40 x 61 x 122 cm y tenían una densidad comprendida entre los 100 kg/m³ y los 130 kg/m³. El principal objetivo de este ensayo era determinar el comportamiento de varios tipos de refuerzo y para eso se hicieron distintas combinaciones de materiales². Las muestras A, B y C se recubrieron con mortero de barro y sus refuerzos iban desde el ligero (muestra A) al consistente (muestra C). Las muestras D, E y F se recubrieron con mortero de cal y cemento con los mismos tipos de refuerzo que los 3 anteriores. En total se utilizaron 4 tipos de refuerzo de recubrimiento:

- 1- El refuerzo ligero de la pared con recubrimiento de barro (caso A) se hizo con 5 cables trenzados que ejercían tensión desde la base a la coronación.
- 2- El refuerzo ligero de la pared con recubrimiento de cemento (caso D) se hizo con una malla metálica de gallinero.

¹ Bruce King with Kevin Donahue, op. cit.

² CONFER – Cale Ash y Mark Ashhlein, op. cit.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

3- El refuerzo medio de la pared con recubrimiento de barro (caso B) se hizo con una malla plástica con hilos de 1,3 mm y separados 2,5 cm.

4- El refuerzo de las restantes muestras (C, E y F) se hizo con una malla soldada de barras cada 5 cm.

7.8.4 Procedimiento de ensayo

En todas las muestras se procedió de forma similar: se aplicó una carga vertical de 2,9 kN/m en la parte superior de los muros y después se aplicó la carga horizontal en la coronación. En el caso de la muestra A se procedió de forma distinta a los demás. La tónica general consistía en aplicar cargas cíclicas en la coronación y ver el comportamiento general del muro. Los valores de las cargas no aparecen reflejados en el informe, pero fueron 16 escalones de carga y varios ciclos se efectuaban con el mismo valor de carga. El caso A no se ensayó de esta forma porque estimaron que esta configuración no era idónea para zonas sísmicas y, simplemente, efectuaron un proceso de carga continua en un sentido¹. La no aptitud de este sistema para acciones sísmicas se debe, en parte, a la falta de uno de los elementos de transmisión de cargas de la coronación a la pared, que es la malla metálica. A falta de ésta, la coronación no transmite correctamente la energía a la pared y se termina deslizando.

La siguiente gráfica refleja el comportamiento de la muestra A ante el ciclo de cargas.

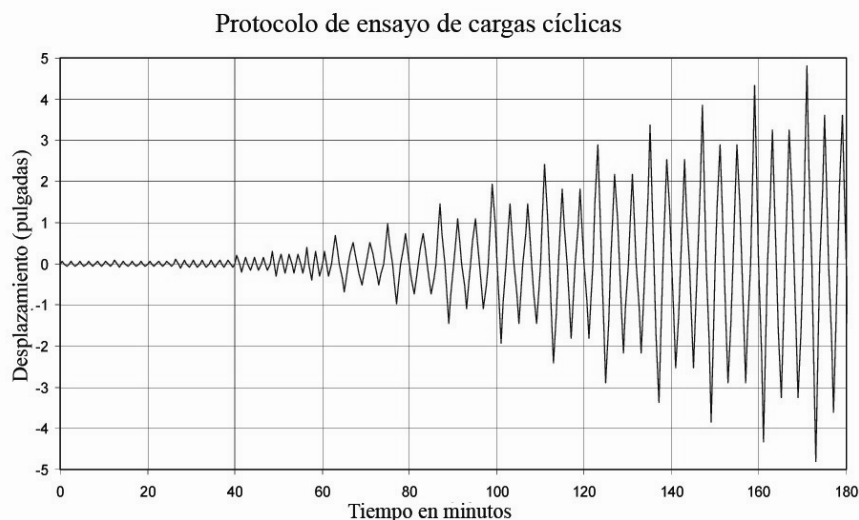


Fig. 7.78- Desplazamiento de la coronación ante cargas cíclicas

En la siguiente imagen se puede apreciar cómo la energía aplicada en la coronación ha sido transmitida a la malla de refuerzo del recubrimiento hasta romperla en parte. Esta rotura no se habría producido, con los mismos valores de carga, si la muestra hubiera sido de mayor longitud, pero lo que refleja es el trabajo realizado por la malla ante una carga cíclica.

¹ CONFER – Cale Ash y Mark Ashhlein, op. cit.



CAPÍTULO 7 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL



Fig. 7.79- Rotura de la muestra E al final del ensayo. [Cale Ash y Mark Ashhleim, op. cit.]

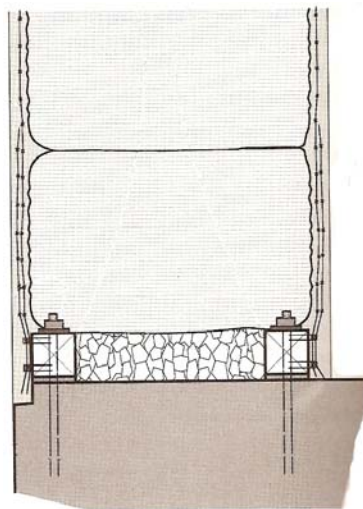


Fig. 7.80- Configuración de la muestra [Bruce King con Kevin Donahue, op. cit.]

Las muestras E y F manifestaron un comportamiento plástico acabando por romper la malla de refuerzo y balanceándose. Las muestras B y C no mostraron este buen comportamiento a causa de la reducida resistencia a compresión del recubrimiento que afectó, sobre todo, a la zona inferior. Este debilitamiento de la zona inferior provocó el deslizamiento de la muestra con respecto a la base¹. El principal problema en esta situación no es que el recubrimiento se desprenda, sino que se deslicen unas balas con respecto a otras o con respecto a la base. Es muy probable que los resultados de los ensayos fuesen muy distintos si las muestras contasen con elementos longitudinales de conexión entre todas las filas de balas. Las muestras que contasen con recubrimiento de cal y cemento seguirían mostrando un mejor comportamiento, pero las otras, de esta forma, mostrarían mucha mayor dificultad para deslizarse, si no tanta como con el recubrimiento más resistente.

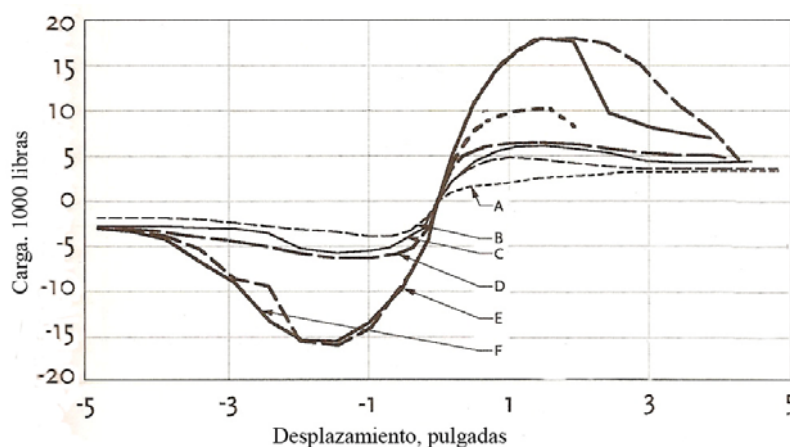


Fig. 7.81- Comparación de los comportamientos de paredes de distintas configuraciones bajo el mismo protocolo de carga [Bruce King con Kevin Donahue]

¹ CONFER – Cale Ash y Mark Ashhleim, op. cit.



7.8.5 Recomendaciones de diseño y conclusiones¹

Una pared de balas de paja con el recubrimiento y la malla de refuerzo con las fijaciones a la estructura superior, inferior y en los extremos, es similar a algunos materiales o configuraciones ya conocidas. Es simplemente un nuevo estilo de estructura.

La resistencia y comportamiento de una pared, bajo cualquier tipo y dirección de carga, depende de:

- la rigidez y resistencia de las estructuras de coronación y de base del muro
- las fijaciones utilizadas para sujetar el refuerzo de los recubrimientos a dichas estructuras
- la rigidez de las sucesivas hileras de balas de paja
- la resistencia y la rigidez tanto del refuerzo como del recubrimiento
- y especialmente, como sucede siempre en la construcción, de la habilidad y el cuidado mostrado en el diseño, en la ejecución y en el curado del recubrimiento.

¹ CONFER – Cale Ash y Mark Ashhlein, op. cit.



Capítulo 8

COMPORTAMIENTO TÉRMICO



CAPÍTULO 8 – COMPORTAMIENTO TÉRMICO

8.1 Introducción

Las construcciones de balas de paja, hechas cuidadosa y correctamente, alcanzan unos buenos niveles de aislamiento térmico con unos costes reducidos. Éstas tienen una alta eficiencia para mantener el calor (o el frío) almacenado o producido dentro¹.

Los fardos de paja son térmicamente eficaces porque poseen valores de aislamiento térmico muy superiores a los de las construcciones convencionales, dependiendo del tipo de paja, de su densidad y del grosor de la pared. Además, la masa resultante del enfoscado de la pared puede colaborar en este sentido².

El valor de la resistencia calorífica de un muro de balas de paja no es fácil de determinar, como se podrá comprobar en el apartado correspondiente al análisis técnico, pero sí se puede decir que un muro de estas características, enfoscado por las dos caras, tendrá un coeficiente de transmisión térmica (U) igual o superior a $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ³. Para hacer una rápida comparación, podemos decir que un cerramiento de fachada convencional formado por dos hojas de fábrica de ladrillo hueco doble, con enfoscado de mortero de cemento por las caras exteriores, cámara de aire con aislamiento térmico y aplacado de piedra por la cara exterior puede tener un valor U en torno a $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$.

El mayor ahorro en las construcciones de balas de paja está en consumo de energía para la calefacción debido a su alto aislamiento térmico. Los costes de calefacción pueden llegar a reducirse significativamente cada año, comparándolos con los de una vivienda convencional⁴.

Para optimizar el rendimiento de las altamente eficaces paredes de un edificio de balas de paja, la construcción debería incluir una cubierta bien aislada, un buen aislamiento en el suelo, ventanas aisladas, un sellado hermético para ajustar las corrientes a lo justo y necesario, y una transpiración óptima del muro. Esta última se consigue de diferentes formas, que se tratarán en el apartado de enfoscados, y tiene la finalidad de permitir el paso del vapor de agua a través de la pared para evitar condensaciones. Además permite que la paja no se sature de humedad.

8.2 Análisis técnico

Existen cuatro procedimientos que han sido utilizados para estimar el comportamiento térmico de los muros de balas de paja:

- 1- Ensayar las balas utilizando una fuente emisora de calor.
- 2- Ensayar una porción de pared en una caja con una fuente emisora de calor.
- 3- Monitorizar el comportamiento de la pared de balas bajo condiciones ambientales.
- 4- Modelar el rendimiento de la pared usando las propiedades físicas conocidas de los materiales.

¹ CONFER – S. O. MacDonald. Versión en Español de: Una introducción visual a la construcción con fardos de paja, 1999. 22p.

² CONFER - Athena Swentzell et al, op. cit.

³ Nehemiah Stone. Thermal Performance of Straw Bale Wall Systems [on line]. Octubre 2003. [Consulta: 10 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.ecobuildnetwork.org>>

⁴ CONFER – Barbara Johnes. Information Guide to Straw Bale Building [on line]. Amazon Nails, 2001. [Consulta: 27 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalefutures.org.uk>>





CAPÍTULO 8 – COMPORTAMIENTO TÉRMICO

En realidad, se puede decir que cualquiera de los procedimientos anteriormente citados proporciona, simplemente, un cálculo aproximado. Cada método tiene sus ventajas y sus defensores así como sus inconvenientes y detractores.

En los dos primeros, el ensayo bajo determinadas condiciones les permite a los investigadores estimar la Resistencia Térmica (R), la resistencia al paso de calor a través del material. Este valor es el inverso del valor U, que es la transmisión térmica. El valor U en el Sistema Internacional se mide en $W./m^2\text{°K}$ y es la energía calorífica (en Wat.) que pasa a través de un elemento constructivo de un determinado espesor con una diferencia de temperatura entre sus dos caras de 1°K .

El tercer método se ha usado para estimar la pérdida calorífica a lo largo de un año o durante otro período. Los resultados se pueden comparar con la cantidad de energía que pierde una vivienda de la misma morfología y volumetría pero de otros materiales.

El último método se basa en principios físicos y procesos informáticos. Consiste en analizar los valores conocidos de resistencia térmica de la paja, del aire y de los materiales que se utilizan para el recubrimiento de la pared, y con ellos desarrollar una resistencia térmica global del sistema. Este valor se puede comparar con el valor R estimado en los dos primeros métodos o se puede utilizar en un análisis de modelado para verificar los resultados de la monitorización de un edificio.

El valor de la Resistencia Térmica para las paredes de balas de paja varía según una serie de factores como son el tipo de paja, el contenido de humedad, la densidad y orientación de la bala, la presencia y el tamaño de otros elementos de pared, el tipo y el espesor del material de acabado y otros factores¹. En este apartado se darán una serie de valores y se identificarán las variables fundamentales.

Este valor no es, en absoluto, una medida de la eficiencia energética que tiene un edificio. Tampoco es una forma de determinar la contribución de la pared al confort térmico. Es un dato que, junto con otra información, puede permitir estimar la pérdida calorífica a través de las paredes.

Cuando se ensaya un material o un sistema constructivo en un laboratorio para determinar su conductividad o resistencia térmica, lo que hace es calcular el flujo de calor de un lado al otro, basándose en la medida de la temperatura superficial y en la energía calorífica necesaria en la cara caliente para mantener el flujo de calor. Esto determina el valor de la conductividad térmica U.

Antes de que se pueda establecer un flujo de calor constante, debe haber un número de lecturas de temperatura con el mismo o muy parecido valor. Para un sistema de construcción tradicional de dos hojas de ladrillo con aislante térmico intermedio, este proceso puede tardar entre 20 minutos y 2 horas. Para las paredes de balas de paja con un acabado superficial, puede durar semanas².

Una diferencia importante en los valores de Resistencia Térmica de dos materiales supone una importante diferencia en la transmisión térmica (U) de éstos cuando hablamos de valores pequeños de R. Esta misma diferencia de valores de R no supone el mismo beneficio por reducción de transmisión térmica cuando se da en valores más elevados que los de la situación anterior. Esto se puede apreciar en la siguiente tabla de valores.

¹ Nehemiah Stone. Thermal Performance of Straw Bale Wall Systems [on line]. Octubre 2003. [Consulta: 10 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.ecobuildnetwork.org>>

² CONFER - Nehemiah Stone, op. cit.





CAPÍTULO 8 – COMPORTAMIENTO TÉRMICO

R-Resistencia Térmica (1/U)	U-Transmisión Térmica (Wat./m ² °K)
2	0,500
4	0,25
6	0,167
8	0,125
10	0,100

Tabla 8.1- [Nehemiah Stone, op. cit.]

Los intentos de determinar la Resistencia calorífica de las balas de paja empezaron en 1993 con una tesis de Joe McCabe¹. Él ensayó balas de paja, tanto de arroz como de trigo, bajo diferentes condiciones de humedad. Además, hizo el ensayo en balas de tres cuerdas (58 cm. de ancho) y de dos cuerdas (42 cm. de ancho). Para las primeras resultaba un valor de R comprendido entre 9,51 y 12,50 (entre 0,11 y 0,08 Wat./m²°K). Para las de dos cuerdas el valor R estaba entre 6,87 y 9,16 (entre 0,15 y 0,11 Wat./m²°K).

En 1994, R.U. Acton realizó en el *Sandia Nacional Lab* un ensayo en balas de paja aisladas de dos cuerdas de 42 cm. de espesor² colocada en posición horizontal. El valor resultante de Resistencia Calorífica fue de 7,75 (U=0,13 Wat./m²°K). Acton no midió el contenido de humedad de la paja y la densidad era de 82 Kg/m³, menos de 2/3 de la densidad de las balas utilizadas por McCabe y bastante menos de lo que permitían los códigos de la construcción de California.

Tanto el ensayo de Joe McCabe como el de R.U. Acton fueron realizados en balas individuales, no en muros de balas de paja. En 1995, Watts, Wilkie, Thompson y Corson realizaron, in situ, un ensayo en una pared de balas de paja y con un espesor total de 47 cm., en una casa en Nova Scotia. Realizaron tres ensayos y, a partir de los resultados, calcularon un valor medio para R de 5 (U=0,20)³.

En 1996, en los *Oak Ridge Nacional Labs* (ORNL), se desarrolló el siguiente ensayo en una pared de balas de paja, más como una experiencia para los profesores de instituto que como un intento de determinar el valor R de una pared de balas de paja⁴. El ensayo fue dirigido por Jeff Christian. La pared tenía unos acabados superficiales y el resultado final del ensayo, teniendo en cuenta el espesor total del muro, determinó un valor de R inferior a 2,99 (U=0,33).

El siguiente año, Nehemiah Stone organizó un nuevo ensayo en *Architectural Testing Labs* (ATI) en Fresno (California)⁵. Fabricó una especie de cajas abiertas por un lado y que se cerraron con balas de paja. Las balas eran de 58 cm. de espesor (de 3 cuerdas) y fueron recubiertas por ambas caras. En la caja se generó calor y se midió la pérdida calorífica a través de la paja. Se encontró con el problema de que no pudo permitir que estas paredes se secaran durante un tiempo antes de realizar el ensayo porque el laboratorio no disponía

¹ CONFER - Nehemiah Stone, op. cit.

² Nehemiah Stone, op. cit.

³ Nehemiah Stone, op. cit.

⁴ Nehemiah Stone, op. cit.

⁵ Nehemiah Stone, op. cit.





CAPÍTULO 8 – COMPORTAMIENTO TÉRMICO

de tiempo. De todas formas, el ensayo mostró unos valores, para las balas colocadas en horizontal, de $R=4,58$ ($U=0,22$) y para las colocadas en vertical (a panderete) de $R=5,81$ ($U=0,17$).

A causa del inconveniente de que los valores de R obtenidos en los ensayos variaban mucho, investigadores y profesionales de la construcción con paja de todo el país cooperaron para construir y ensayar en los ORNL una muestra representativa de los muros de balas de paja que se estaban construyendo en aquel momento. En 1998, Jeff Christian, David Eisemberg (una autoridad en la construcción con balas de paja) y otros construyeron una pared en estos laboratorios. Utilizaron balas de dos cuerdas de 48 cm. de espesor y le aplicaron un recubrimiento de yeso por ambas caras. Este recubrimiento lo dejaron secar durante 2 meses y después de este tiempo las balas tenían un 13% de humedad lo cual se mantenía dentro de los límites recomendados. El resultado obtenido fue de $R=4,84$ ($U=0,21$) para las balas de 2 cuerdas. Este resultado equivalía a un $R=5,81$ ($U=0,17$) para las balas de 3 cuerdas¹.

Una conclusión muy interesante de este ensayo fue que, a igualdad de espesor, la transmisión térmica de la paja embalada era menor en el caso de las balas en vertical que con las balas en horizontal. Como resultado de esta conclusión se determinó que una pared de unos 61 cm de espesor con las balas en horizontal tenía el mismo efecto de transmisión térmica que otra de 41 cm de espesor con las balas en sentido vertical².

Todos los anteriores resultados de ensayos de laboratorio fueron obtenidos de acuerdo con las normas estadounidenses, que no se corresponden con las europeas y, por lo tanto, aquí sólo sirven como mera orientación. Por esta razón, en Austria se ensayaron balas de paja de diferentes densidades dentro del programa “Wall Systems made of Renewable Resources” (Sistemas de Paredes construidas con Recursos Renovables)³. Los ensayos de aislamiento térmico fueron realizados por el *Municipal Department 39* (Viena) de acuerdo con la ISO 8301 y la ÖNORM B6015 parte 1 y tenían como objetivo determinar el Coeficiente de Conductividad Térmica (λ) que se expresa en $W/m^{\circ}K$.

Según la norma ISO 8301, el resultado fue de $\lambda=0,0337 W/m^{\circ}K$ con el material seco y a $10^{\circ}C$ y según la ÖNORM B6015 el valor final fue de $\lambda=0,0380 W/m^{\circ}K$. De acuerdo con la normativa europea, el valor de referencia tiene que ser determinado con un contenido de humedad del 20%. De esta forma, el valor de referencia para las balas de paja de una densidad de $100 Kg/m^3$ es de $\lambda=0,0456 W/m^{\circ}K$. Para que nos hagamos una idea, éste es un valor muy parecido al que tiene el aglomerado de corcho que se usa como aislante térmico. Además, las balas de paja tienen mucho mayor espesor que las planchas de corcho que se utilizan y así se obtienen resultados mucho mejores. Utilizando unas balas de paja de 48 cm. de espesor se podría alcanzar un valor aproximado de $U=0,10 W/m^2K$.

Estos valores de aislamiento térmico suponen una importante reducción de costes. La siguiente tabla⁴ ofrece una comparación aproximada de los costes de distintos materiales, con parecido coeficiente de conductividad, para alcanzar un coeficiente de transmisión térmica (U) igual a $0,15 W/m^2K$. El espesor requerido de cada material, para alcanzar este valor, aparece en la tercera columna y el precio de cada

¹ Nehemiah Stone, op. cit.

² CONFER – Nehemiah Stone y Bruce King. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7.

³ CONFER - GrAT – Center for Appropriate Technology / Viena University of Technology. Heat Insulation Performance of Straw Bales and Straw Bale Walls [on line]. Viena, noviembre 2000. [Consulta: 5 septiembre 2006]. Disponible en web: <<http://www.grat.tuwien.ac.at>>

⁴ GrAT – Center for Appropriate Technology / Viena University of Technology, op. cit.





CAPÍTULO 8 – COMPORTAMIENTO TÉRMICO

material en la cuarta. La última columna muestra los costes del material aislante para una vivienda media de 150 m².

Material	Coef. Conduct (W/m ² K)	Espesor (cm.)	Coste (€/m ²)	Coste total
Bala de paja	0,045	30	3,63	1453
Poliestireno expandido	0,038	24	20,35	8139
Lana de roca	0,038	24	23,55	9418

Tabla 8.2- [Heat Insulation Performance of Straw Bales and Straw Bale Walls, op. cit.]

Existen algunos estudios importantes sobre la monitorización de edificios de balas de paja (vimos el ejemplo de la bodega en California). Uno de estos fue dirigido en 1996 por Gail Brager, de la Universidad de Berkeley (California), utilizando como modelo el Real Goods Center en Hopland. Los sensores medían la Humedad Relativa interior y exterior, además de la temperatura superficial de las paredes, en un período de diez días. Los datos mostraron una buena capacidad de las paredes para atenuar los cambios de temperatura.

Otro proyecto de monitorización de edificios (que se detallará posteriormente) fue dirigido por la *Canada Mortgage and Housing Corporation* (CMHC) en once casas de balas de paja construidas entre 1996 y 2001¹. Los datos no fueron suficientes como para determinar directamente un valor de Resistencia Térmica. CMHC comparó el consumo de energía de estas casas con el consumo de una vivienda convencional y descubrió que las casas de balas de paja utilizaban un 20% menos de energía de calefacción. Este dato pudo ser extraído para estimar la Resistencia Térmica basándose en las superficies de pared y en otras superficies conductoras. Existen limitaciones a la utilidad de los resultados de la monitorización de edificios para determinar el valor R. Estas limitaciones se deben a que el comportamiento del edificio está afectado por más factores que el valor R, tales como condiciones climatológicas cambiantes, aportaciones de calor interior o humedad. En realidad, existen otras características propias del muro que afectan al comportamiento y que se deben tener en cuenta como puede ser la masa térmica.

Las propiedades físicas de las balas de paja, especialmente las relacionadas con la transmisión térmica, son ciertamente variables, dentro de unos límites, porque las balas pueden no ser homogéneas y no todas iguales. Cuando la paja es embalada, puede haber partes de ésta que queden más apretadas y otras más holgadas. Además, se puede apreciar que en los extremos de estos fardos la paja está más suelta que en las zonas en las que están las cuerdas que comprimen el material. La paja puede parecer que en algunas zonas está orientada en un sentido mientras que en otras puede no estar tan bien definida su orientación.

¹ CONFER - Nehemiah Stone, op. cit.



CAPÍTULO 8 – COMPORTAMIENTO TÉRMICO

8.3 Conclusiones sobre el comportamiento térmico

Los ensayos han mostrado un abanico de resultados que van desde $R=2,99$ (para una pared de 46 cm. de espesor) hasta $R=12,50$ (para una bala de 58 cm.). Se debe destacar que todos los ensayos realizados en sistemas de paredes de balas de paja, antes del ensayo de 1998 en Oak Ridge National Labs, presentaban defectos y, por lo tanto, no se deben tener mucho en consideración¹. El segundo ensayo realizado en los ORNL no tenía ningún defecto identificable y es considerado por la mayoría de la gente como la más exacta determinación de la Resistencia Térmica de las paredes de balas de paja. El ORNL determinó una $R=4,84$ para las balas de 2 cuerdas y una $R=5,81$ para las de 3 cuerdas. Estableciendo un margen de seguridad, la California Energy Commision estableció oficialmente para las paredes de balas de paja un valor $R= 5,28$ ($U=0,19 \text{ Wat./m}^2\text{°K}$).

Una vez que se ha alcanzado este valor de Resistencia Térmica, no tiene demasiada importancia de si se trata de $R=6$, $R=7$ o $R=8$. Cada vez que aumenta este dato en un punto, la diferencia se va haciendo menor en cuanto a conductividad térmica. Además, un valor $U=0,19$ ya es bastante mejor que el de un cerramiento convencional de doble hoja de fábrica de ladrillo con aislante térmico intermedio, que puede estar en torno a un $U=0,3 \text{ Wat./m}^2\text{°K}$.

Los datos del ensayo realizado en Austria muestran valores más positivos, incluso después de afectar los datos del ensayo por un coeficiente de seguridad. Tomando como referencia el valor resultante de la conductividad térmica para un ejemplo de una pared de 35 cm. de espesor de balas de paja y 25 mm. de recubrimiento de mortero mixto por cada cara, el valor de la transmisión térmica de la pared resulta de **$0,13 \text{kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$** .

Para comprobar el buen funcionamiento del sistema de construcción con balas de paja, en el Center for Appropriate Technology (Austria) han construido, en el año 2005, un edificio de demostración y lo han monitorizado para obtener datos de su comportamiento a largo plazo.



Fig. 8.1- S-HOUSE (Strawbale House) [GrAT – Center for Appropriate Technology / Viena University of Technology]

¹ Nehemiah Stone, op. cit.

Capítulo 9

COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

9.1 Introducción

Para conseguir que las balas de paja de una pared conserven sus buenas propiedades durante bastante tiempo son básicas dos cosas: mantener el contenido de humedad dentro de los límites máximos permitidos y permitir que el conjunto de la pared sea permeable al vapor de agua. La paja, según las características que poseen las fibras, no es un material al que le afecte con facilidad el vapor de agua del ambiente. Lo que más le afecta a las fibras de la paja es el contacto prolongado con agua líquida, ya sea de condensaciones, de precipitaciones o de fugas. En este sentido es fundamental proteger las paredes de paja del suelo para evitar el ascenso de agua por capilaridad. Igualmente es importante protegerlas de la incidencia directa o indirecta del agua de la lluvia. La condensación intersticial es quizás el punto más peligroso de todos ya que tarda en manifestarse y cuando lo hace, es muy difícil actuar en consecuencia.

Permitir que el conjunto de la pared sea permeable al vapor de agua es uno de los principios generales para el buen comportamiento de la pared. En locales húmedos, cumplir este principio sería quizás un gran problema. La producción del vapor de agua en estos locales es elevada, por no hablar del contacto que se puede llegar a establecer entre los recubrimientos y el agua líquida. El control del vapor de agua en estos locales se debe hacer si cabe con más esmero, permitiendo una buena ventilación sobre todo en los momentos en los que la cantidad de vapor de agua en el interior es elevada. Si el clima no lo permite, incluso puede ser necesario tener que recurrir a aparatos que realicen esta función.

Si se diera el caso de que se detectase un principio de putrefacción puntual, se podría realizar una reposición de las piezas afectadas, eso sí, procurando en la medida de lo posible detectar la causa y neutralizarla para que no pueda suceder de nuevo. Se trata de un procedimiento ciertamente complejo que se debe evitar.

9.2 La paja como acumulador de humedad

Las superficies en contacto con moléculas de vapor de agua tienen tendencia a capturar estas moléculas; este proceso se denomina *adsorción*. La mayoría de los materiales de construcción son porosos y tienen grandes superficies internas con poros. De esta forma, las moléculas de vapor de agua penetran por los poros internos del material y el contenido de agua de éstos aumenta significativamente. Esto es lo que se conoce como *higroscopicidad* de los materiales. Materiales como el plástico o el acero no tienen porosidad interna y, por lo tanto, no son higroscópicos, es decir, no capturan la humedad del vapor de agua que está en el ambiente.

Según aumenta la humedad relativa, el contenido de humedad de los materiales porosos aumenta porque más vapor de agua del que está en el ambiente se adhiere a las paredes de los poros del material. Cuando la humedad relativa supera el 80% o el 90% se empieza a formar agua líquida en los poros más pequeños e incluso en los más grandes¹.

¹ CONFER – John Straube. Moisture Properties of Plaster and Stucco for Strawbale Buildings [on line]. Disponible en web: <<http://www.ecobuildnetwork.org>>





CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

La relación entre la humedad relativa y el contenido de humedad es única para cada material como se aprecia en la siguiente gráfica.

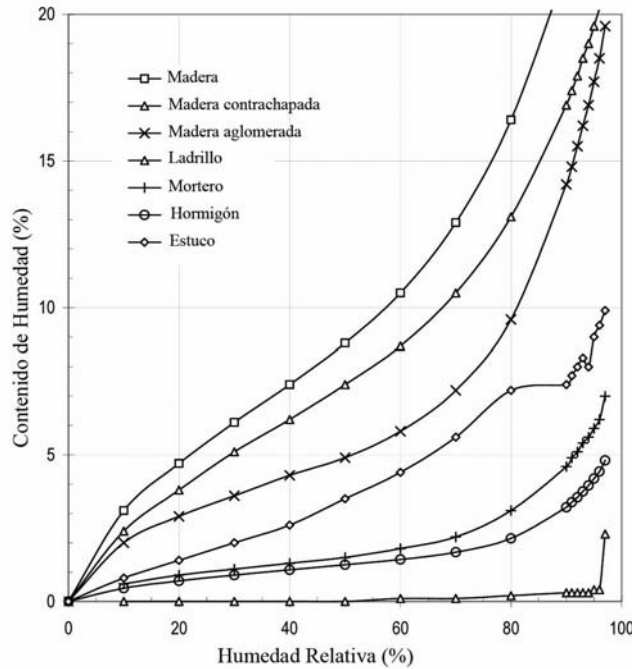


Fig. 9.1- Gráfica que relaciona la humedad relativa con el contenido de humedad de distintos materiales [John Straube, op. cit.]

La gráfica siguiente¹ representa la relación entre la humedad relativa y el contenido de humedad para la paja de centeno a diferentes temperaturas.

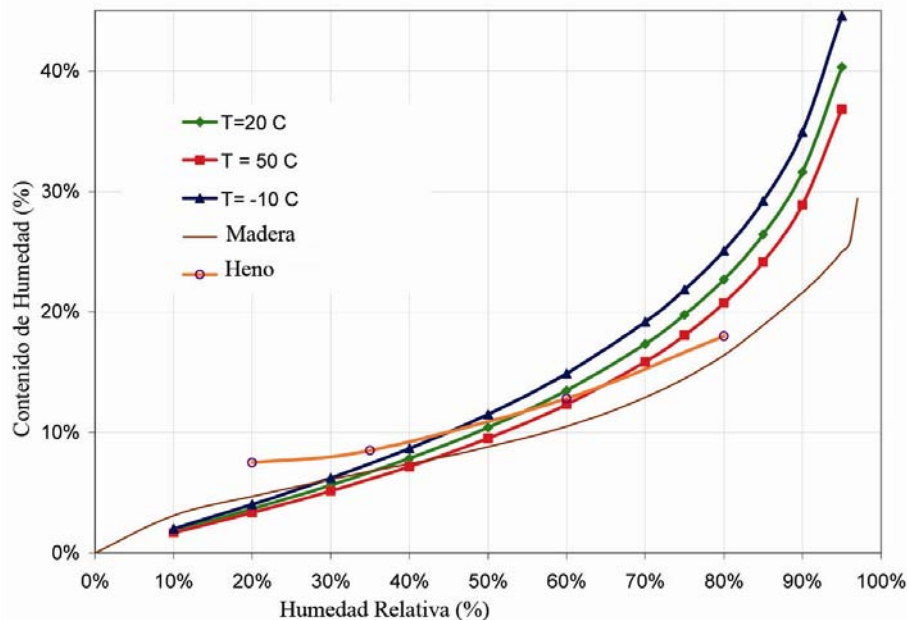


Fig. 9.2- Gráfica de Humedad Relativa/Contenido de Humedad en paja de centeno [Lamond & Graham, 1993]

¹ Lamond, W.J. y Graham, R. The Relationship Between the Equilibrium Moisture Content of Grass Mixtures and the Temperature and Humidity of the Air. Journal of Agricultural Engineering Resources, 1993. 335 p.



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

Cuando un material ha absorbido del ambiente todo el vapor que puede (esto sucede cuando el material está en una habitación con un 100% de humedad relativa durante mucho tiempo), aún puede almacenar más humedad en los poros y fisuras por medio de la capilaridad o la absorción. Por ejemplo, la madera (y posiblemente la paja) absorbe vapor del ambiente hasta aproximadamente el 25% de contenido de humedad a un 98% de humedad relativa pero para tener una saturación capilar puede almacenar entre 2 y 3 veces esta cantidad de agua¹.

9.3 Comportamiento higrotérmico de las paredes

9.3.1 Problemas de humedad

La humedad, cuando está presente en las construcciones, causa un gran número de problemas. Los más serios suelen ser daños estructurales a causa de la pudrición de la madera, corrosión del acero o crecimiento de hongos en las superficies interiores.

Para que se de lugar un problema relacionado con la humedad, se tienen que cumplir al menos 4 condiciones:

1. debe existir una fuente de humedad
2. debe existir un camino o un vehículo que transporte esta humedad
3. debe existir algún factor que cause el movimiento de la humedad
4. los materiales y/o la combinación de estos deben ser susceptibles a la humedad

La eliminación de simplemente uno de estos factores puede prevenir un problema relacionado con la humedad. En la práctica es imposible eliminar todas las fuentes de humedad, construir paredes sin imperfecciones, eliminar todas las fuerzas que causan el movimiento de la humedad, o utilizar materiales que no sean susceptibles de dañarse a causa de la humedad. La mejor forma de diseñar edificios resistentes a la humedad es controlar la presencia de humedad mientras que se reduce el riesgo de fallo con el diseño y la elección de materiales.

9.3.2 El equilibrio higrométrico

Si se mantiene un equilibrio entre la humectación y el secado, la humedad no se acumulará durante tiempo y los problemas relacionados con ésta tendrán menos posibilidades de producirse. Por lo tanto, cuando se calcula el riesgo de daño a causa de la humedad, se debe considerar el nivel y la duración de la humectación y el secado junto con la habilidad del material o del sistema constructivo para acumular humedad de forma segura². Las paredes de balas de paja tienen una importante capacidad de almacenamiento de humedad y de secado.

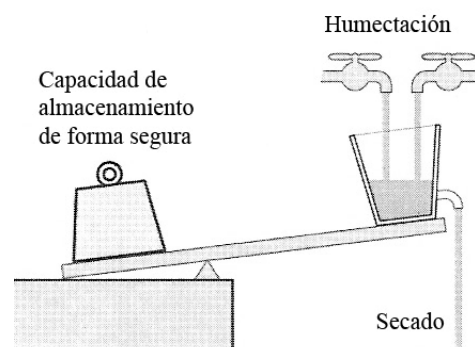


Fig. 9.3- [Bruce King con John Straube, op. cit]

¹ CONFER – John Straube, op. cit.

² CONFER – Bruce King con John Straube, op. cit.

9.3.3 Los orígenes de la humedad¹

Las cuatro principales fuentes de humedad en un cerramiento de una construcción son:

1. precipitación, tanto la directa como la que pueda discurrir por la fachada o la que salpique desde el suelo.
2. vapor de agua en el aire transportado por difusión y/o movimiento del aire a través de la pared.
3. incorporada durante la construcción
4. agua procedente del suelo que ascienda por capilaridad.

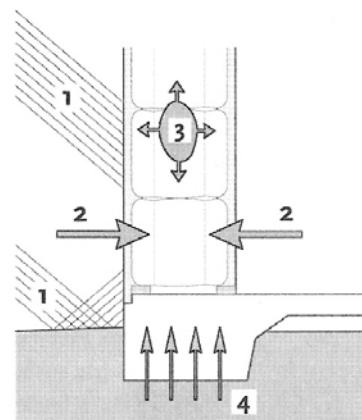


Fig. 9.4- [Bruce King con John Straube, op. cit]

1. El agua de lluvia es por lo general la principal fuente de humedad en una construcción, por lo que debe ser controlada. Existen varias formas para controlar el agua de la lluvia, pero el almacenamiento para una posterior expulsión es una de las prácticas más exitosas.

2. El vapor de agua, generado por la actividad de los ocupantes (baño, cocina,...), suele causar problemas en los hogares. Se deben controlar los niveles interiores de humedad con ventilación en climas fríos y deshumidificación en climas cálidos y húmedos para reducir la cantidad de humedad interior. Este vapor se suele transportar con el movimiento del aire.

3. La humedad suele estar también en los materiales de construcción. La madera puede contener un 25% de humedad, la paja se suele colocar con un 12% aproximadamente de humedad y el hormigón contiene grandes cantidades de agua cuando es vertido. Esta fuente de humedad debe ser controlada limitando el uso de materiales húmedos o permitiendo que se sequen antes de cerrar por completo la construcción.

4. El vapor de agua en el suelo está presente en prácticamente cualquier lugar, incluso en los desiertos. Se deben colocar materiales con baja permeabilidad al vapor de agua entre el suelo y el cerramiento para impedir la difusión del vapor en el cerramiento. Igualmente, se debe impedir el ascenso de agua por capilaridad. El borrador del futuro *California Straw Bale Code* recomienda la utilización de grava para ello.

¹ CONFER – Bruce King con John Straube, op. cit.

9.3.4 Evacuación de la humedad y secado

La humedad suele abandonar un cerramiento de las siguientes formas:

1. evaporación del agua transportada por capilaridad a las superficies interiores y exteriores.
2. difusión, tanto al interior como al exterior
3. drenaje
4. ventilación, que normalmente no es efectiva en los cerramientos de balas de paja.

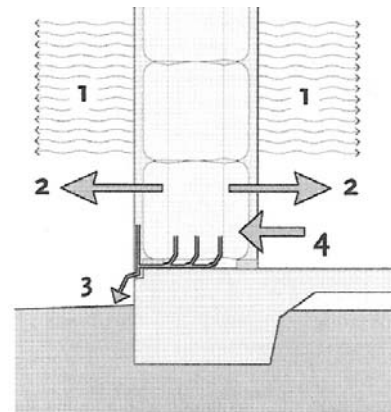


Fig. 9.5- [Bruce King con John Straube, op. cit]

El vapor de agua puede desplazarse por medio de la difusión y el movimiento del aire. Algunos materiales con baja permeabilidad al vapor de agua, tales como el acero o el plástico, resisten el abandono del vapor por difusión. En climas cálidos, este proceso puede suceder tanto al interior como al exterior, y en climas fríos tiende a ocurrir hacia el exterior. En la mayor parte de los climas, las construcciones deberían ser diseñadas para permitir este proceso en ambas direcciones. La dirección en la que esto puede suceder varía con las condiciones climatológicas.

Ventilar las balas de paja por entre estas y el recubrimiento no es útil debido a la resistencia de la paja comprimida y embalada para el flujo de aire, resistencia que es elevada. Sin embargo, la ventilación sería efectiva entre el recubrimiento exterior y una capa protectora colocada sobre este recubrimiento exterior¹. De este modo tendríamos una fachada trasventilada.

9.3.5 Acumulación de humedad

La habilidad de un material de construcción o de un sistema constructivo para acumular humedad es importante ya que ello representa el período de tiempo que puede existir entre ambientes secos y húmedos antes de que comiencen los problemas.

La humedad se puede acumular en una pared de diversas formas (sólido, líquido o gaseoso). El volumen de agua que puede ser acumulada en una pared puede ser elevado, del orden de unos 10 Kg por cada metro cuadrado².

¹ CONFER – Bruce King con John Straube, op. cit.

² CONFER – Bruce King con John Straube, op. cit.

CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

9.3.6 Técnicas de control de humedad

El principal factor que puede afectar a la durabilidad de una pared de balas de paja es el agua de la lluvia. Sin embargo, el agua del suelo que ascienda por capilaridad o el vapor de agua del ambiente también pueden influir en dicho comportamiento.

La forma en la que un edificio tenga que ser influido por el agua de la lluvia se puede modificar con diseños y con ubicaciones adecuadas.

9.3.6.1 Control de la lluvia

Mantener el agua de la lluvia fuera de los locales que habitamos es una de las principales funciones de las paredes de las construcciones. Esto es debido a que esta es la principal fuente de humedad. Los problemas relacionados con la humedad pueden afectar a la apariencia de un cerramiento por medio de la decoloración, sin contar los problemas de salud que se pueden derivar a causa del crecimiento de hongos.

Dependiendo de los materiales, detalles, habilidades del constructor o de la exposición, una pared puede estar diseñada para drenar cualquier cantidad de agua que le llegue, almacenarla y posteriormente evacuarla, o repelerla perfectamente. Las paredes de balas de paja tienden a utilizar la propiedad del almacenamiento, no debiendo estar demasiado expuestas a la lluvia, mientras que otros diseños repelentes al agua están indicados para aplicaciones de elevada exposición a la lluvia.

Controlar los efectos de la lluvia sobre una pared se puede conseguir por medio de:

1. Evitar el agua de la lluvia
2. Acumular, repeler o drenar el agua
3. Secado

1. Evitar el agua de la lluvia

El clima y el microclima tienen una importancia fundamental en la exposición al agua de la lluvia. Existen zonas en las que las precipitaciones y los vientos son especialmente agresivos.

El emplazamiento también juega un papel importante en la exposición al agua de la lluvia y a los vientos que la puedan transportar. Una ubicación cercana a edificios o arbolado puede garantizar la ausencia de la incidencia directa de fuertes vientos que depositen agua en las paredes de una construcción.

Una vez que el agua de la lluvia ha alcanzado la superficie de una pared, son muchos los factores que afectan a la migración de esta agua hacia el interior del muro, por ejemplo la intensidad de la lluvia o la suavidad del paramento. Partiendo de esto, es importante alejar todo lo posible la mayor cantidad de agua posible de la superficie de la pared. Esta es la función de los vierteaguas cuando se diseñan adecuadamente.

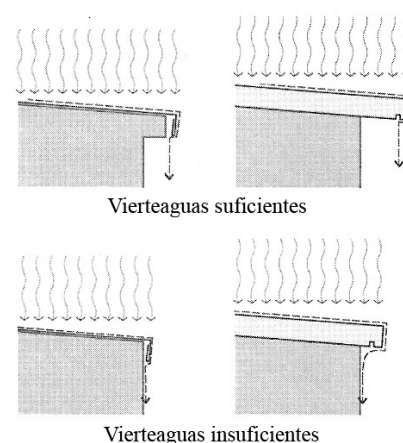


Fig. 9.6- [Bruce King con John Straube, op. cit.]



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

2. Acumular, repeler o drenar el agua

La estrategia de acumular el agua de la lluvia que se deposita en la cara externa de la pared pero que no se drena, ha sido utilizada durante mucho tiempo. Ésta consiste en un cerramiento con la suficiente masa como para poder ir almacenando esta agua, antes de que llegue a la cara interna, para posteriormente poder evacuarla al exterior.

La configuración de la fachada para que pueda repeler el agua de la lluvia se puede considerar un sistema de “barrera perfecta”, para el que suelen ser necesarios sistemas modernos como pueden ser los hidrófugos de superficie, u otros no tan modernos, como los alicatados.

Para poder drenar el agua es necesario que parte de la lluvia que incide en la superficie de una pared penetre a través de una capa externa, tras la cual se producirá el drenaje. Algunos ejemplos de sistemas de paredes drenadas incluyen los “cavity walls” o las fachadas trasventiladas. Este tipo de soluciones de fachada ofrecen una perfecta protección frente a la incidencia directa del agua de lluvia, aliviando de forma considerable la cara externa del muro.

3. Secado¹

Controlar el vapor de agua, así como evitar las condensaciones o asegurar un secado, es la parte más importante para tener controlada la humedad. Una pared que separa dos ambientes distintos necesita una barrera frente al aire. Ésta es necesaria para reducir la pérdida de energía, controlar las condensaciones en el interior de la pared, aislar el aire del interior de las balas de paja del aire del interior de la construcción, reducir el riesgo de incendio y reducir la transmisión sonora.

Las condensaciones en el interior de una pared pueden ocurrir si el aire húmedo del interior migra al exterior en tiempo frío. Éstas suceden preferentemente en superficies sólidas por lo que, en una pared de balas de paja, lo más probable es que suceda en la cara interna del recubrimiento antes que en el interior de la bala de paja.

Los recubrimientos de estas paredes forman una buena barrera frente al aire. De todos modos, algún traspaso de aire siempre va a suceder. Para evitar problemas causados por estas pequeñas cantidades de aire húmedo que atraviesen la pared se debería controlar la humedad relativa del interior del local. Esto se puede lograr por medio de la ventilación, y tiene especial importancia en los locales húmedos.

Como la paja y el recubrimiento son higroscópicos, su contenido de humedad depende de la humedad relativa, y a su vez, la humedad relativa depende de la temperatura del aire. Si el exterior de la bala de paja se enfría, que suele suceder durante la noche y por la mañana, la humedad relativa del aire que rodea la paja se eleva, provocando posiblemente la condensación del vapor de agua. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento y la permeabilidad al vapor de tanto la paja como de la mayor parte de los recubrimientos es elevada. Por lo tanto, según aumenta la humedad relativa del aire durante este enfriamiento, los materiales higroscópicos absorben el vapor y lo almacenan. Esta es la forma de redistribución del vapor de la cara caliente de la pared a la cara fría.

¹ CONFER - Bruce King con John Straube. Design of straw bale buildings, op. cit



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

El secado o la humectación de las balas de paja se producen casi exclusivamente por difusión del vapor. El aire se mueve lentamente a lo largo de las balas de paja, pero no se mueve con la facilidad necesaria como para permitir un rápido secado. Por lo tanto, para facilitar un rápido secado se deben utilizar recubrimientos con elevada permeabilidad al vapor de agua.

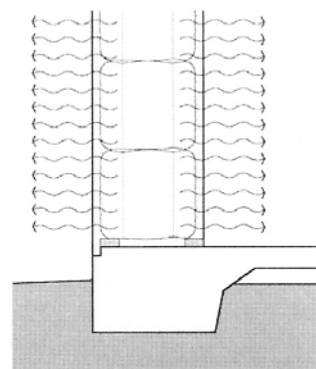


Fig. 9.7- Proceso de secado al interior y al exterior de una pared de balas de paja húmedas [Bruce King con John Straube, op. cit.]

9.3.6.2 Control de la difusión y barreras de vapor

Aunque muchos de los problemas de condensación se producen a causa de las migraciones de aire, la difusión de vapor puede causar también condensaciones. Las paredes deben ser diseñadas para asegurar una mínima difusión de vapor de agua, pero a la vez deben permitir el secado de la humedad con la suficiente facilidad. En mayoría de los casos es deseable un sistema con una elevada permeabilidad al vapor de agua para asegurar la rápida difusión y secado de cualquier humedad que haya podido ocurrir accidentalmente.

La paja no proporciona mucha resistencia al flujo de vapor de agua, pero el recubrimiento puede tener un abanico amplio de valores de permeabilidad. Según la experiencia y los cálculos, una capa de baja permeabilidad al vapor de agua no es deseable en las paredes de balas de paja con recubrimiento. El nivel de permeabilidad del recubrimiento exterior se debería mantener lo suficientemente elevado para permitir un correcto secado. En una vivienda, la permeabilidad al vapor de la capa de recubrimiento interna debería ser lo suficientemente elevada como para asegurar un secado hacia el interior, pero lo suficientemente baja como para evitar la difusión al interior de una cantidad importante de vapor de agua. Alcanzar el equilibrio no es siempre fácil. Sin embargo, en climas con al menos un mes de tiempo frío (temperatura media diaria inferior a 5°C), la capa de recubrimiento interior no debería ser menos permeable que la capa exterior. En climas con varios meses de tiempo frío (4 meses o más), la permeabilidad al vapor de agua del recubrimiento interior debe ser inferior a 300 o 350 ng/Pa s m². Si se controla la humedad interior mediante una buena ventilación durante los meses fríos, el nivel de permeabilidad de la capa interna de recubrimiento se puede elevar hasta 600 ng/Pa s m². Si no hay meses fríos en dicho clima, la permeabilidad de la capa de recubrimiento interna puede ser tan elevada como se quiera¹. Según la opinión del Doctor John Straube, que las paredes efectúen parte del secado hacia el interior no es preocupante desde el punto de vista de la habitabilidad. El ritmo al que se produce este secado es inferior al de la renovación normal del aire interior.

¹ CONFER - Bruce King con John Straube. Design of straw bale buildings, op. cit

CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

9.3.7 Condensaciones intersticiales

Existen zonas geográficas que, por sus condiciones de humedad relativa y temperatura, son propicias para que se produzcan condensaciones intersticiales en los cerramientos exteriores de las construcciones. Galicia es una de ellas y por eso se suele utilizar una configuración de dos hojas de fábrica de ladrillo separadas por una capa de aislamiento térmico y una cámara de aire. En esta situación, lo ideal es que se produzcan las condensaciones en la cámara de aire, evacuando el agua en estado líquido por unos conductos hacia el exterior.

Las paredes de balas de paja no cuentan, o no suelen contar, con una cámara de aire en la que se puedan concentrar las condensaciones para que éstas no se produzcan en el material. Es por esto por lo que parece necesario tener que comprobar si un cerramiento va a tener condensaciones intersticiales antes de construirlo. A continuación se va a proceder a comprobar esta cuestión utilizando un modelo informático del Colegio de Arquitectos de Galicia.

La configuración del cerramiento es la que aparece en la figura 9.8: balas de paja colocadas en sentido vertical (espesor 35 cm.) y un recubrimiento de 2,5 cm. por cada lado de mortero de cal y cemento (1:1:6).

Según ensayos realizados por John Straube¹, dicho mortero tiene una permeabilidad de 7,3 ng/Pa s m, lo que supone una resistividad al vapor de agua de 0,119 mmHg m² día/g cm.

Una bala de paja de 60 cm. espesor cuenta con una permeancia² de entre 114,6 y 229,2 ng/Pa s m², lo que expresado en resistividad al vapor de agua equivale a un valor comprendido entre 0,01262 y 0,00631 mmHg día m²/g cm.

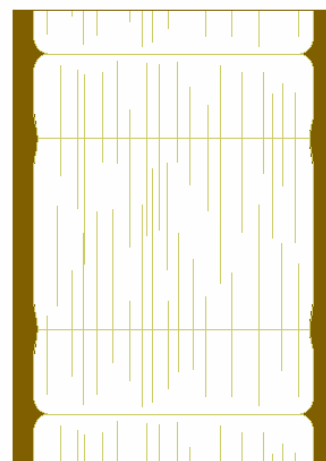


Fig. 9.8- Esquema del cerramiento

Para realizar una primera comprobación de si existen condensaciones intersticiales o no, se ha supuesto una situación con una temperatura exterior de 5°C y la interior de 20°C, a la vez que se considera una humedad relativa exterior del 90% y la interior del 80%. Estos valores de humedad relativa son bastante conservadores, ya que, aunque sí es posible que se lleguen a alcanzar aquí en Galicia, no es probable que permanezcan durante mucho tiempo.

Con los datos ya mencionados, se procedió a realizar el cálculo de las condensaciones intersticiales y el resultado es el que se presenta en la figura 9.9:

¹ John Straube. Moisture Properties of Plaster and Stucco for Strawbale Buildings [on line]. 2000. Disponible en web: <<http://www.balancedolutions.com>>

² Bruce King con John Straube. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7

CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

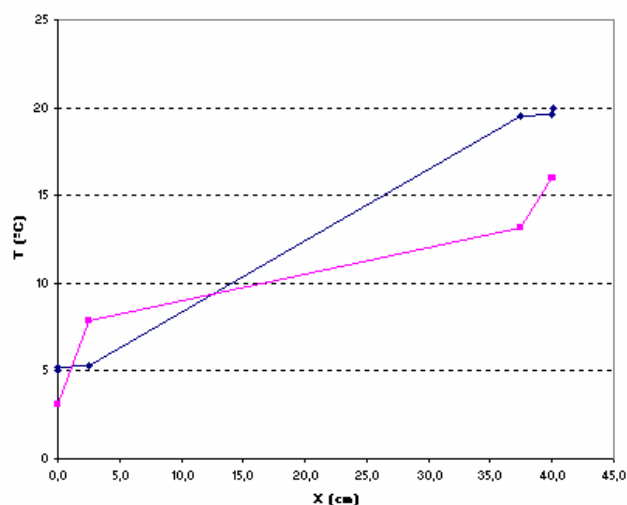
El gráfico indica que, con los datos de los materiales utilizados y en las condiciones ambientales mencionadas, existen condensaciones del vapor de agua en la zona más exterior de la bala de paja y en la unión con el recubrimiento exterior.

Se sabe que tanto la paja como el mortero de cal y cemento tienen la propiedad de poder incorporar una cantidad considerable de vapor de agua a su estructura interna de microporos. Además, tanto a lo largo del día como del mes o del año, las condiciones ambientales van cambiando, lo que significa que el agua líquida de la condensación no va a estar en esa zona permanentemente. Por si esto fuera poco, el conjunto del cerramiento (paja y mortero mixto) tiene la propiedad de permitir con relativa facilidad la difusión del vapor de agua, tanto al exterior como al interior.

A pesar de saber cual es el comportamiento de la pared en esta situación, el gráfico anterior le ha sido enviado al profesor John Straube de la Universidad de Waterloo, Canadá, para conocer la

opinión de un profesional con amplia experiencia, tanto en el estudio del comportamiento higrotérmico de los cerramientos como en el estudio del comportamiento de la paja en condiciones de humedad. Uno de sus comentarios ha sido acerca del carácter estático de la aplicación informática utilizada, ya que no se corresponde con las variaciones reales y especialmente con las de un cerramiento de balas de paja con mortero mixto. Este tipo de cerramientos tiene una gran capacidad de almacenamiento de la humedad en condiciones de seguridad hasta alcanzar una situación que corresponda con lo que indica la gráfica. Para el comportamiento higrotérmico de este tipo de cerramientos recomienda una aplicación informática que contemple tanto las variaciones de las condiciones ambientales como el comportamiento del material ante la humedad.

Para terminar el comentario, dice que el vapor de agua no es casi nunca un problema para las balas de paja, sino que lo suelen ser el agua de lluvia o la humedad del suelo que pueda ascender por capilaridad.



DATOS DE INTERÉS			ESTADO
Esesor x	T de cerramiento	T de rocío	
0,000	5,000	3,110	NO EXISTEN CONDENSACIONES
0,000	5,221	3,110	NO EXISTEN CONDENSACIONES
2,500	5,326	7,855	EXISTEN CONDENSACIONES
37,500	19,485	13,129	NO EXISTEN CONDENSACIONES
40,000	19,590	15,968	NO EXISTEN CONDENSACIONES
			NO EXISTEN CONDENSACIONES
			NO EXISTEN CONDENSACIONES
			NO EXISTEN CONDENSACIONES
			NO EXISTEN CONDENSACIONES
			NO EXISTEN CONDENSACIONES
			NO EXISTEN CONDENSACIONES
			NO EXISTEN CONDENSACIONES
40,150	20,000	15,968	NO EXISTEN CONDENSACIONES

Fig. 9.9- Condensación intersticial en un muro de balas de paja

CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

Como muestra de que las variaciones en las condiciones ambientales suponen una variación del comportamiento de la pared, la imagen de la derecha muestra un estado límite sin condensaciones en donde la humedad relativa exterior es del 80% y la interior es del 64%.

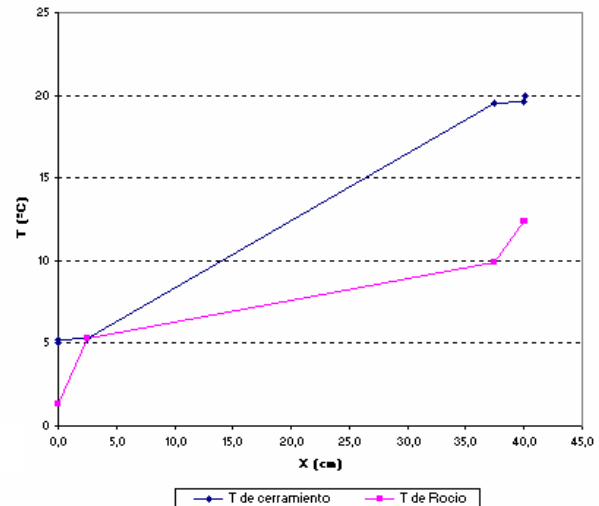


Fig. 9.10

La gráfica de la derecha muestra otra situación límite en la que aún no se producen condensaciones. En este caso, la temperatura exterior es de 8°C, la humedad relativa exterior del 80% y la interior del 77%.

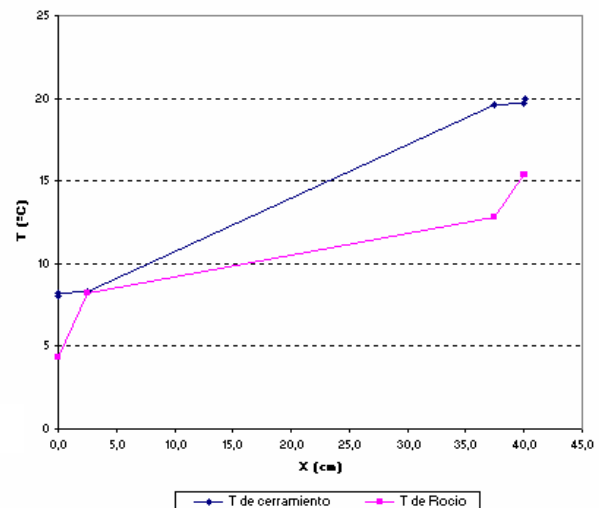


Fig. 9.11

Los valores de temperatura y humedad relativa de estos dos últimos casos se encuentran dentro de la zona cómoda para el ser humano, cuyos valores están reflejados en la figura 9.12¹.

De todos modos, es importante saber que no se deben permitir de forma prolongada valores de humedad relativa iguales o superiores al 80%. Los picos de HR de forma puntual (15 minutos o una hora) no influyen en las condiciones de habitabilidad ni en el comportamiento de los materiales. Para una temperatura interior de unos 20°C, lo ideal es no superar el 65% de HR.

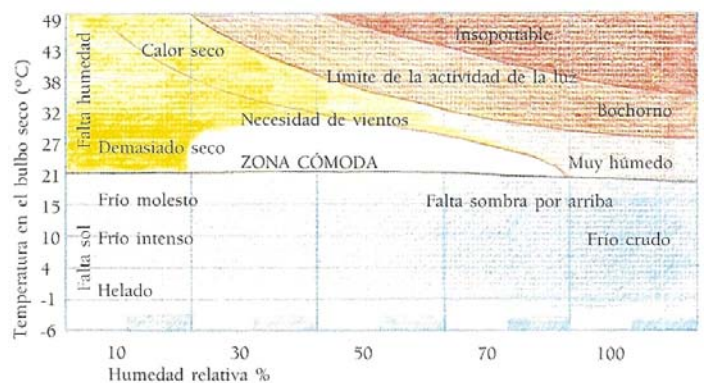


Fig. 9.12- Gráfica que refleja los distintos tipos de ambiente posibles dentro de un local

¹ David Pearson. El libro de la casa natural. 3ª edición. Barcelona, 2000. Ed. RBA libros. 286 p. ISBN: 84-7901-023-1

CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

A pesar de los cálculos que se han hecho hasta el momento, la forma más precisa de determinar el comportamiento de estas paredes a las condensaciones intersticiales es con la experiencia a partir de casos reales. Después de haber realizado varias construcciones en determinados ambientes es cuando se puede determinar con exactitud su comportamiento.

9.3.8 Locales húmedos

La Humedad Relativa interior es un aspecto de especial importancia en los locales húmedos tales como cocinas o baños. En estas estancias la producción de vapor de agua puede ser enorme, sobre todo en los cuartos de baño. En ocasiones se supera el 100% de humedad relativa condensándose el vapor de agua del aire después de hacerlo sobre todas las superficies frías del local.

Es una costumbre ampliamente adoptada el recubrir los paramentos verticales de los locales húmedos con cerámica esmaltada. Esto es así principalmente por cuestiones higiénicas; a causa de las características que poseen, las paredes de estos locales deben ser limpiadas con frecuencia de forma que se evite el crecimiento de hongos o bacterias. Si esta limpieza la hubiera que realizar sobre un recubrimiento de mortero con un acabado de pintura al silicato, su efectividad no sería la misma, sin contar con que la pintura se deterioraría muy rápidamente.

Cuando nos planteamos un local húmedo en una construcción con balas de paja nos encontramos con la limitación de permitir la permeabilidad al vapor de agua de los cerramientos exteriores. En un clima como el de Galicia, el proceso de secado de las paredes hacia el exterior se ve muy limitado por la temperatura exterior y por las horas de insolación, razón por la que se debe facilitar en lo posible que las paredes puedan secar al interior. En esta situación, el profesor John Straube plantea realizar un alicatado sobre un soporte continuo que cree una cámara de aire entre el recubrimiento de la pared de balas de paja y el alicatado. Dicha cámara debería estar ventilada al exterior. Una solución para estos casos podría ser un trasdosado de placas de cartón-yeso sobre rastreles, trasdosado que podría ventilar la cámara por la parte inferior. Hay que recordar que esta solución no es necesaria en todo el local, sino únicamente en los paramentos exteriores, que pueden ser uno o, como mucho, dos de los 4 o más que puede tener dicha estancia.

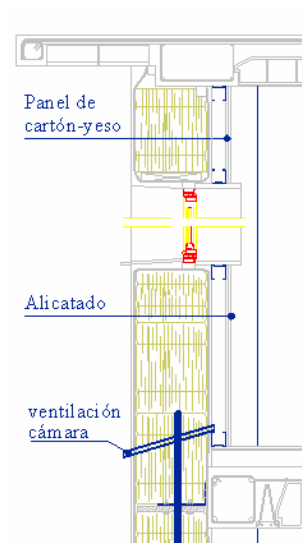


Fig. 9.13- Propuesta de trasdosado interior

El borrador del futuro *California Straw Bale Code* establece ciertas limitaciones con el objetivo de proteger las balas de la humedad. Como regla general no permite la utilización de membranas impermeables al vapor de agua, de modo que se facilite la transpiración de la pared. Para ello limita el grado mínimo de permeabilidad que pueden tener los materiales que se utilicen en la pared, limitación establecida en 287 ng/Pa s m^2 . La excepción se produce en los locales húmedos, obligando a la colocación de una membrana impermeable al agua y recomendando una permeabilidad máxima de 57 ng/Pa s m^2 . Para esta situación son ideales las láminas impermeables al agua y permeables al vapor de agua como las de la marca Tyvek.

**9.3.9 Ensayo de humedad y temperatura en muestras de paja¹****9.3.9.1 Introducción**

La cantidad de nutrientes y la cantidad de oxígeno no son parámetros que se puedan cambiar una vez que la bala de paja ha sido colocada en el muro y éste ha sido enfoscado. Sin embargo, el contenido de humedad y la temperatura sufre alteraciones a causa de la climatología, las condiciones interiores o la introducción accidental de agua. Por esta razón, es importante conocer los efectos que los diferentes regímenes de temperatura y humedad tienen en la paja que conforma el muro. En la Universidad de California (Davis) se realizó un estudio para investigar esto en muestras de paja de arroz.

9.3.9.2 Descripción del ensayo

Con el objetivo de determinar los valores de la descomposición con un alto nivel de exactitud, se sellaron en contenedores unas muestras de paja y se monitorizó la evolución de la formación de dióxido de carbono. Según se va desprendiendo el carbono de la paja, el oxígeno del contenedor se va convirtiendo en dióxido de carbono. Monitorizando la cantidad de dióxido de carbono producida por la paja se puede estimar la cantidad de carbono perdido. Este dato sirve para conocer la cantidad de materia orgánica que se está descomponiendo en la paja. Una pérdida rápida de materia orgánica indica una importante degradación y se debe evitar. Otros signos de descomposición son el olor, la temperatura elevada en una zona concreta o manchas que acompañan la transformación de la materia orgánica en dióxido de carbono.

En el primer experimento se recogió paja de arroz del campo, se hicieron muestras que se secaron hasta conseguir un contenido de humedad inferior al 12% del peso seco y se almacenó durante varios meses. Posteriormente, cada una de estas muestras se humedeció en un porcentaje comprendido entre el 12% y el 150% del peso seco y se introdujo en un contenedor sellado. Estos contenedores se colocaron en ambientes con 10°C, 20° y 35°C y se monitorizó, durante dos meses, la evolución del dióxido de carbono.

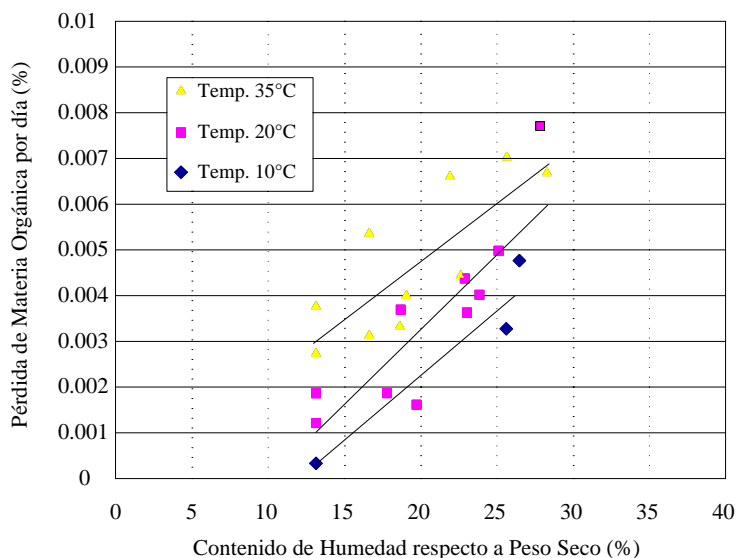
Básicamente, este estudio demostró que la producción del dióxido de carbono de cada muestra fue bastante constante durante las dos semanas y generalmente creciente con la temperatura y el contenido de humedad. En el caso de las muestras con un contenido de humedad inferior al 39%, la descomposición de materia orgánica fue inferior al 0,009% por día, aunque serían necesarios más datos con contenidos de humedad entre 27% y 39%. Si la pérdida del 0,009% por día se mantuviera durante un año entero, entonces, en teoría, el 3% de la materia orgánica pasaría a ser dióxido de carbono. En realidad, se estima que este porcentaje iría decreciendo hasta aproximarse a cero, debido a que la reducción progresiva del oxígeno iría paralizando este proceso. Para comprobar esto sería necesario un experimento de larga duración. De todos modos, es muy probable que una estructura de paja se mantenga en estas condiciones por un período superior a 50 años. Estos resultados sugieren que la humedad por si sola no es capaz de iniciar un proceso importante de descomposición.

¹ CONFER - Matthew D. Summers, Sherry L. Blunk, Bryan M. Jenkins. How Straw Descomposes: Implications for Straw Bale Construction [on line]. California, 2003. [Consulta: 10 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.ecobuildnetwork.org>>



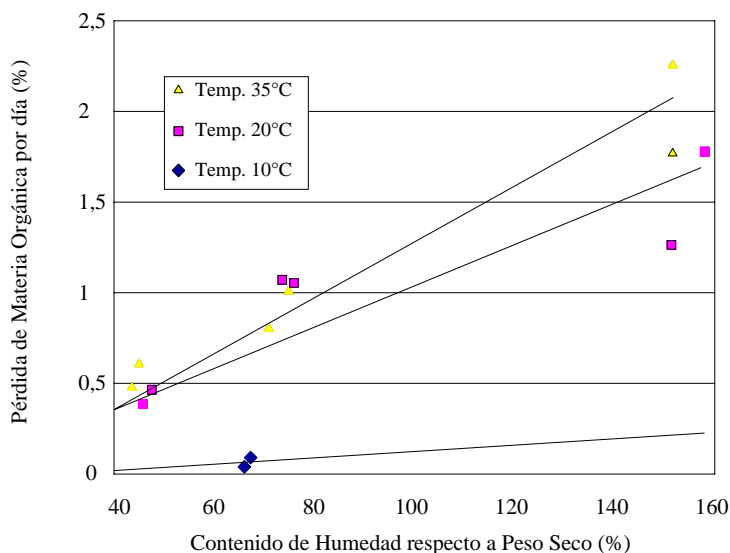
CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

Fig. 9.14- Gráfico de pérdida de materia orgánica en muestras de paja de arroz con contenidos de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras - Matthew D. Summers, Stherry L. Blunk, Bryan M. Jenkins, op. cit.



Con contenidos de humedad superiores al 39%, la fibra de paja está saturada y tiene humedad libre en las superficies. En los experimentos, la velocidad de descomposición aumenta significativamente después de este punto de saturación. Con contenidos de humedad entre el 40% y el 150%, la pérdida de materia orgánica se encuentra entre el 0,5 y el 2% por día, entre 50 y 200 veces más rápido que con contenidos de humedad inferiores al punto de saturación. A estos niveles se descomponen importantes cantidades de paja en un corto período de tiempo. La paja se decolora y pierde propiedades estructurales en pocas semanas o meses.

Fig. 9.15- Gráfico de pérdida de materia orgánica en muestras de paja de arroz con contenidos de humedad por encima del punto de saturación de las fibras [Matthew D. Summers, Stherry L. Blunk, Bryan M. Jenkins, op. cit.]





CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

Se están realizando más experimentos con paja de arroz y de trigo, pero se esperan básicamente los mismos resultados, con altos niveles de descomposición a partir del punto de saturación de la paja.

9.3.9.3 Conclusiones sobre el comportamiento de la paja húmeda¹

Dos aspectos importantes para construir con paja son saber qué nivel de contenido de humedad es aceptable y qué hacer cuando se detecta esta humedad. A continuación se presentan algunas recomendaciones que deben ser seguidas:

- Sólo se deben usar fardos que tengan un contenido de humedad inferior al 25% del peso seco. Esto asegura que no existe humedad libre y que el contenido de humedad es inferior al requerido para el crecimiento de microorganismos. Si los fardos se humedecen durante el transporte o almacenaje hay que asegurarse de que se secan antes de colocarlos en el muro; aunque externamente la paja parezca seca, su interior puede estar húmedo. Se debe evitar el uso de fardos que han estado expuestos a la humedad antes de ser colocados en el muro porque contendrán mayor cantidad de microorganismos.
- El contenido de humedad indica una situación apta para la descomposición, pero una elevada temperatura es un indicativo claro de descomposición. Ésta desprende dióxido de carbono y además calor.
- Las situaciones en las que el agua penetre en el muro o se sospeche de una importante condensación deben ser investigadas. Primero se debe examinar el muro para determinar la profundidad y extensión de la humedad. Si se localiza un contenido alto de humedad simplemente en la superficie, bajo el enfoscado, es probable que se termine secando sin mayor problema, pero si ésta se encuentra en el núcleo del fardo, entonces la temperatura debe ser monitorizada hasta que el fardo se seque. Este proceso puede durar semanas o incluso meses dependiendo de las condiciones exteriores. Se debe tener precaución de no aumentar el nivel de ventilación en el muro durante este período ya que aumentaría la descomposición. Se pueden hacer unos simples agujeros que se puedan tapar con facilidad posteriormente para impedir la entrada de oxígeno.

Aunque es muy poco probable que ocurra, una pared cuya temperatura se eleve por encima de los 60°C debe ser desmontada por razones de seguridad. La manera de hacer esto es retirar el recubrimiento de la cara exterior, teniendo a mano agua para apagar las posibles llamas que puedan producirse al exponer la paja al oxígeno.

¹ CONFER - Matthew D. Summers, Stherry L. Blunk, Bryan M. Jenkins, op. cit.





CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

9.4 Comportamiento higrotérmico de los recubrimientos

9.4.1 Introducción

La paja, al igual que la madera, se degrada cuando se expone a una suficiente cantidad de humedad durante un determinado período de tiempo. Por lo tanto, uno de los factores más importantes en el comportamiento de las paredes de balas de paja es el control de la humedad. La mejor forma de conseguir este control es seleccionar materiales que aseguren un equilibrio entre la humectación y el secado. De esta forma se estará garantizando la durabilidad de las paredes.

Para predecir el comportamiento ante la humedad se necesita tener conocimiento de las propiedades de los materiales. En las paredes de balas de paja, el material más importante es el recubrimiento. En la actualidad se suele poner en la cara interna del cerramiento una barrera de vapor pero algunos defensores de la construcción con balas de paja desaconsejan su uso en este caso¹.

Con el propósito de saber si una pared está funcionando bien o no, es necesario conocer los valores de la permeabilidad al vapor de agua del recubrimiento y los valores de permeabilidad requerida. El secado de las paredes se produce, básicamente, a través de la difusión del vapor. Para predecir el proceso de secado del agua almacenada en las paredes es necesario conocer la permeabilidad de los recubrimientos exterior e interior.

Los movimientos del aire y la penetración de la lluvia son las dos principales causas de humedad en las paredes. Las balas de paja son muy permeables al vapor y al agua y, por lo tanto, el control de la entrada de esta humedad depende del recubrimiento. La capacidad de un recubrimiento exterior de absorber y almacenar agua es peligrosa debido a que ésta puede ser transportada al interior a las balas de paja por difusión del vapor e, incluso, por capilaridad.

Finalmente, para colaborar en el control de la penetración y la absorción de la lluvia, también existen productos repelentes del agua y selladores.

Por todas estas razones, la *Canada Mortgage and Housing Corporation* patrocinó un proyecto para medir la absorción de agua y la permeabilidad al vapor de agua de diverso tipo de recubrimientos. A continuación se presenta la descripción de este ensayo.

9.4.2 Análisis técnico

9.4.2.1 Propiedades de los materiales.

La permeancia al vapor de agua de las balas de paja no ha sido muy estudiada, pero según el Doctor John Straube, una bala de paja de 45 cm de espesor podría tener una permeancia de entre 110 y 330 ng/Pa s m².²

La relación agua/cemento (a/c) afecta, en gran medida, a la estructura del poro del recubrimiento. Cuanto mayor es esta relación, mayor es el número de poros abiertos del producto terminado, mayor la

¹ CONFER – John Straube. Moisture Properties of Plaster and Stucco for Strawbale Buildings [on line]. 2000. Disponible en web: <<http://www.balancedolutions.com>>

² John Straube, op. cit.





CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

permeabilidad al vapor de agua y mayor la absorción de agua. La densidad, y por tanto la estructura de poros de los recubrimientos, también es sensible a la forma de aplicación.

9.4.2.2 Procedimiento de ensayo

En el ensayo mencionado se realizaron los siguientes procesos:

- 1- Aplicar un abanico de recubrimientos diferentes directamente a las balas de paja.
- 2- Retirar las muestras de las balas.
- 3- Aplicar varias capas de protección (pinturas y recubrimientos hidrófugos) a alguna de las muestras.
- 4- Realizar el ensayo de permeancia al vapor bajo condiciones reales de gradiente térmico.
- 5- Realizar el ensayo de absorción capilar.

Las muestras

Se diseñaron un número de muestras que abarcaban los tipos de recubrimientos más utilizados. La dosificación de todas estas muestras se hizo en referencia a volumen.

Las dosificaciones son las siguientes:

- A - 1:3 Cemento : Arena
- B - 1:1:6 Cemento: Cal : Arena
- C - 1:2:9 Cemento : Cal : Arena
- D - 1:3 Cal : Arena
- E - Arcilla : Arena “recubrimiento de barro”

Variaciones:

- A1 - Como el A pero con una pintura al caucho
- A2 - Como el A pero con un tratamiento de siloxane
- B1 - Como el B pero con un tratamiento de aceite de linaza
- B2 - Como el B pero con una pintura al caucho
- B3 - Como el B pero con un tratamiento profundo de siloxane
- B4 - Como el B pero con un pasteado de cal
- B5 - Como el B pero con una imprimación de látex y pintado
- B6 - Como el B pero con imprimación y pintura en base aceite
- C1 - Como el C pero con tratamiento de aceite de linaza
- D1 - Como el D pero con un pasteado de cal

Preparación de las muestras

Cada muestra fue preparada en una bala de paja y todas se colocaron pegadas a una pared para permitir la aplicación vertical. El recubrimiento de algunas se aplicó en tres capas dejando un tiempo de curado entre una y otra y resultando un espesor final de entre 32 y 54 cm. Las muestras se mantuvieron en el interior protegidas del viento, el sol y la lluvia, con una temperatura de entre 10° C y 20° C durante, por lo



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

menos, 90 días. Después de este tiempo se procedió a cortar las muestras de las balas con un tamaño de 150 mm. x 150 mm.

9.4.2.3 Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad es la propiedad que define la facilidad con la que el vapor de agua atraviesa un material. Los muros se secan fundamentalmente al exterior por la difusión del vapor de agua de la bala y del recubrimiento, razón por la que es importante la permeabilidad del recubrimiento. Hay que decir que la permeancia al vapor de agua depende de la humedad relativa. Según aumenta la humedad relativa va aumentando la permeancia¹.

Permeancia

El ensayo de permeancia se hizo según la norma ASTM E96. Las muestras se colocaron sobre un recipiente sellado e impermeable al vapor de agua que tenía un nivel de agua de unos 20 mm para crear una humedad relativa constante del 100%. La muestra, junto con este recipiente, se colocó sobre unas cuñas en un contenedor más grande, que tenía en el fondo agua con sal para crear una humedad relativa constante del 75%. Los resultados de los ensayos se expresaron en ng/Pa. s. m². Para obtener estos resultados se dividió el peso en ng del agua evaporada durante un tiempo entre ese mismo tiempo en segundos, el área de evaporación y la diferencia de presión entre los dos ambientes expresada en Pa.

Permeabilidad

Hay que decir que este ensayo se realizó solamente con las muestras que no tenían varias capas de recubrimiento. Esto es debido a que cada capa de recubrimiento puede tener una permeabilidad distinta a las demás a causa de muchos factores pero, de entrada, ya por la densidad a causa de la aplicación. Los resultados se expresaron en ng/Pa s m. Este valor se consigue si se divide la permeancia entre el espesor medio de la muestra en metros². El valor total de permeancia (M) de una muestra de dos capas se obtiene de la siguiente forma:

$$M \text{ (total)} = 1/(1/M1 + 1/M2)$$

Por lo tanto, la permeabilidad se calcula solamente para muestras de una única capa de espesor.

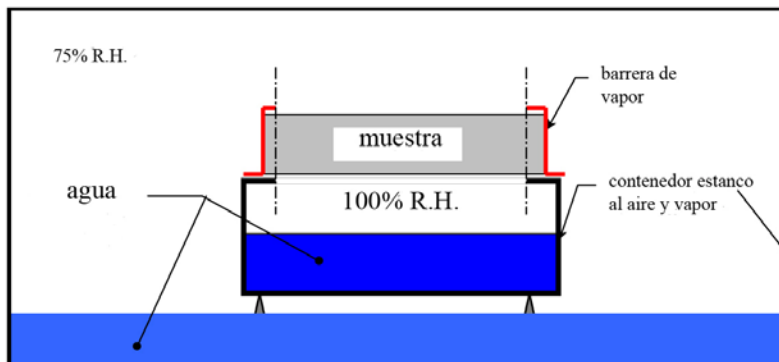


Fig. 9.16- Esquema del ensayo de permeancia al vapor de agua. [John Straube, op. cit.]

¹ CONFER – John Straube, op.cit.

² John Straube, op. cit.

CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO



Fig. 9.17- Muestra del ensayo de permeancia al vapor de agua. [John Straube, op. cit.]

9.4.2.4 Resultados

Las muestras necesitan un tiempo para alcanzar el equilibrio con el ambiente. Este tiempo es de unas pocas semanas, en el caso de las muestras de cal y arena, y mucho más largo para las de cemento y arena¹.

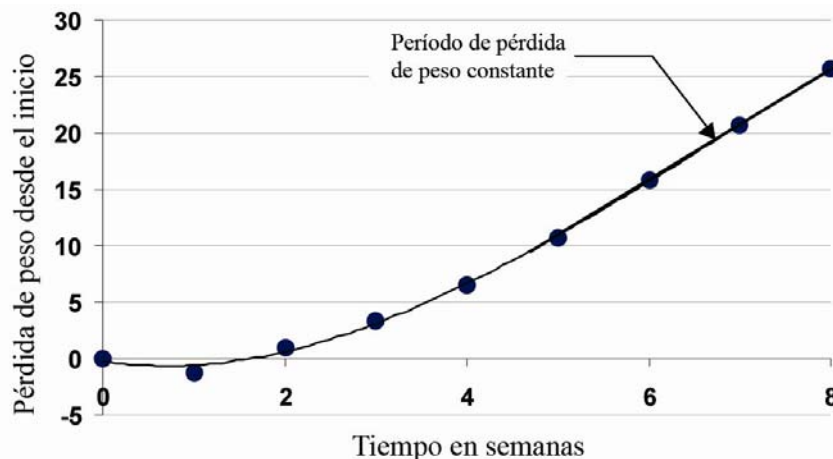


Fig. 9.18- Gráfica de pérdida de peso de la totalidad de la muestra ensayada [John Staube, op. cit.]

El período inicial se corresponde con un aumento de peso de la muestra. Esto sucede porque la muestra absorbe vapor del ambiente, ya que inicialmente estaba muy seca. Una vez que la muestra alcanza el equilibrio con los dos ambientes, la pérdida de peso va aumentando hasta que alcanza un ritmo constante².

Los resultados muestran que la muestra de cemento y arena es la más impermeable. La de cemento, cal y arena (1:1:6) muestra una mayor permeancia y aún más si nos vamos a la 1:2:9. La más permeable de todas es la de cal y arena. La permeabilidad y permeancia de las diferentes muestras aparecen reflejadas en la tabla 9.1:

¹ CONFER – John Straube, op. cit.

² CONFER – John Straube, op. cit.



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

Muestra	Espesor (mm)	Permeancia (ng/Pa s m ²)	Permeabilidad (ng/Pa s m)
Cemento : Arena			
1:3	43,5	39	1,7
1: 3 con pintura al caucho	39,5	40	-
1:3 Con siloxane	41,0	40	1,7
Cemento : Cal : Arena			
1:1:6	35	295	10,3
1:1:6 con aceite de linaza	36	223	8,0
1:1:6 con pintura al caucho	32,5	244	-
1:1:6 con siloxane	41	203	8,3
1:1:6 con pasteado de cal	53,5	81	4,3
1:1:6 con latex y pintura	36,5	203	-
1:1:6 con aceite y pintura	40	41	-
Cemento : Cal : Arena			
1:2:9	50,5	295	14,9
1:2:9 con aceite de linaza	50,5	259	13,1
Cal : Arena			
1:3	33,5	565	18,9
1:3 con pasteado de cal	32	459	14,7

Tabla 9.1- [John Staube, op. cit.]

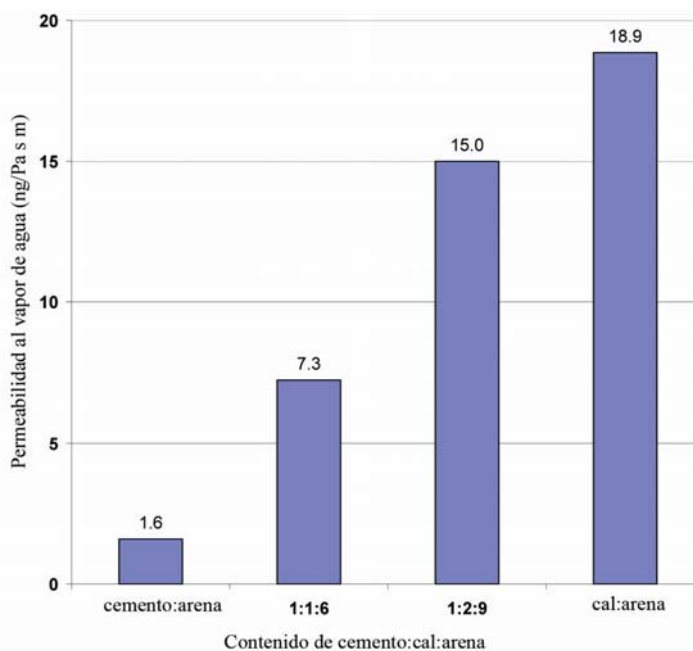


Fig. 9.19- [John Staube, op. cit.]



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

Capilaridad

Los materiales que tienen poros en la superficie tienden a absorber agua. Durante el período de lluvia, el agua se deposita en la superficie del recubrimiento y posteriormente es absorbida por éste. Este agua se almacena en el recubrimiento y puede llegar a entrar en contacto con la paja, pero también puede evaporarse al exterior cuando se calienta por el sol.

Este ensayo se realizó siguiendo la EuroNorm TC 89/WG10 N95. Las muestras estaban inmersas en el agua a una profundidad de entre 1 y 2 mm y su peso se midió varias veces durante las 24 primeras horas. La ganancia de peso por unidad de área se reflejó en relación a la raíz cuadrada del tiempo ($\text{kg/m}^2 \text{s}^{1/2}$), como muestra la siguiente tabla:

Muestra	Succión ($\text{kg/m}^2 \text{s}^{1/2}$)
Cemento : Arena	
1:3	0,0378
1: 3 con pintura al caucho	0,0085
1:3 Con siloxane	0,0004
Cemento : Cal : Arena	
1:1:6	0,0917
1:1:6 con aceite de linaza	0,0665
1:1:6 con pintura al caucho	0,0146
1:1:6 con siloxane	0,0006
1:1:6 con pasteado de cal	0,1005
1:1:6 con latex y pintura	0,0197
1:1:6 con aceite y pintura	0,0140
Cemento : Cal : Arena	
1:2:9	0,11
1:2:9 con aceite de linaza	0,1052
Cal : Arena	
1:3	0,1273
1:3 con pasteado de cal	0,1608

Tabla 9.2- [John Staube, op. cit.]



Fig. 9.20- Esquema del ensayo de capilaridad [John Straube, op. cit.]



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

9.5 Desarrollo de sensores higrométricos

En Canadá, la construcción con balas de paja está aún poco extendida, pero mucha gente se está interesando por este sistema. Donde más se ha construido con paja es en la zona sur de los Estados Unidos, que tiene un clima mucho más cálido y con inviernos menos duros que los de Canadá. En EEUU, estas construcciones están bastante probadas con respecto a los problemas de humedad y los resultados han sido satisfactorios, pero en Canadá, al ser una construcción menos habitual, la gente siente preocupación por el comportamiento de las balas de paja ante la humedad. Esta es la razón por la que la *Canada Mortgage and Housing Corporation* (CMHC) está llevando a cabo estudios para desarrollar un sensor higrométrico económico que la gente pueda tener en sus casas y así controlar este aspecto. Entre los dispositivos estudiados se incluyen algunos como higrómetros electrónicos, sensores de madera o el simple pesado de la paja.

En Canadá tienen el Micronta RH Meter, que obtiene datos de temperatura y humedad pero su estructura no es apta para obtener datos del interior de una bala de paja¹. Para probarlo en este sentido realizaron una modificación en su estructura que consistió en separar los sensores del mecanismo y colocarles unos cables a modo de extensión. De este modo, el sensor estaría en el interior del muro y el monitor del aparato en la superficie. Ésta es una forma fácil, rápida y económica de obtener datos de humedad relativa y temperatura interior al instante.

También han hecho estudios con sensores de madera que consisten en medir la conductividad de una pieza de madera insertada en la pared². Con este método se obtiene, al momento, el valor de la conductividad eléctrica de la madera y, a partir de éste, el del contenido de humedad. Estas piezas suelen ser de madera de balsa porque es más fácil de trabajar para conformarla. Los experimentos realizados han demostrado que existe una buena correlación entre la conductividad de la madera y el contenido de humedad.

Estas piezas de madera necesitan un tiempo para estar en equilibrio con el entorno. La Humedad Relativa varía con mucha facilidad y por eso estos sensores proporcionan datos más realistas que los obtenidos a través de la HR.

Otra forma de medir el contenido de humedad y que no necesita ningún mecanismo especial, aparte de un horno y una pesa, es el desecado y pesado de una muestra de paja. Se pesa la muestra una vez extraída y se vuelve a pesar después de haber estado en el horno a 120°C hasta alcanzar peso constante. La diferencia de pesos es sencillamente el contenido de humedad.

Una forma de simplificar este ensayo es dejar un trozo de tubería introducido en la pared en sentido perpendicular a la misma y que tenga acceso a ella desde la superficie. Cuando se desee hacer la medición basta con insertar una pequeña cantidad de paja hasta el centro del muro por esta tubería, que tendrá perforaciones en el extremo. Se dejará un tiempo, hasta que su humedad entre en equilibrio con la del muro y después se extrae para realizar el proceso de secado.

¹ CONFER - Canada Mortgage and Housing Corporation. Straw Bale Moisture Sensor Study [on line]. Canadá, 1997. [Consulta: 28 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.cmhc-schl.gc.ca>>

² CONFER - Canada Mortgage and Housing Corporation, op. cit.



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

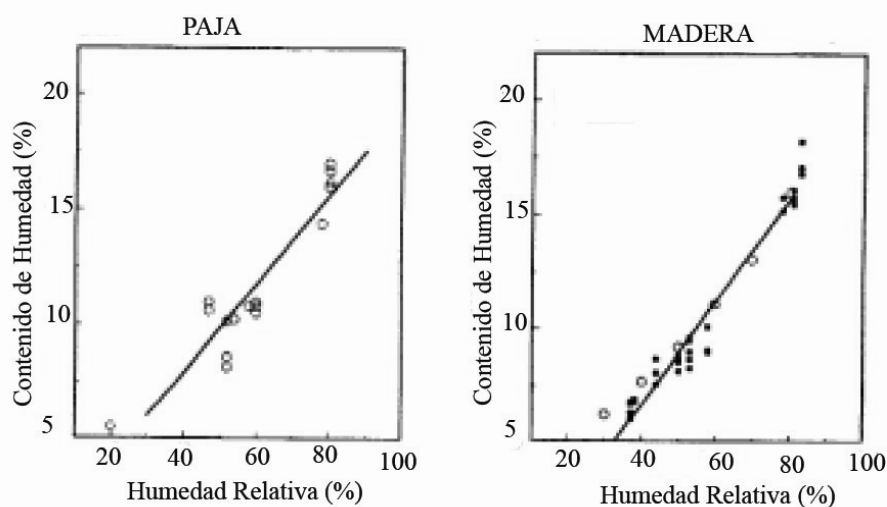


Fig. 9.21- Muestras de paja y de madera de balsa. [Canada Mortgage and Housing Corporation, op. cit.]

9.6 Estudios de humedad en muros

Como complemento al estudio para desarrollar sensores higrométricos, la CMHC se dedicó a analizar la situación de varias casas de paja construidas en los años 80 en varias localidades de Québec.

En Nova Scotia, los ensayos realizados para medir la humedad de una pared han llegado a tener lecturas superiores al 95% en la zona en contacto con el enfoscado, incluso cuando la lectura en el núcleo del muro era mucho menor¹. Esto indica que el contenido de humedad no es uniforme en todo el espesor de pared y estos valores no son preocupantes, porque esto no significa necesariamente que el contenido de humedad en la paja sea elevado. Además, al estar próximo a la superficie, tendrá facilidad para evaporarse si el recubrimiento es permeable al vapor de agua.

En uno de los muros analizados se observó que, después de un período de lluvias, los sensores situados cerca del enfoscado exterior mostraban unos valores de humedad relativa elevados que duraron semanas, incluso después de que regresara el buen tiempo. Al mismo tiempo, un sensor de humedad de madera estaba en la misma ubicación e indicaba una relativa sequedad. La conclusión que se extrae es que las paredes de balas de paja no son especialmente propensas a retener humedad². Gracias a estas propiedades, las paredes pueden funcionar en climas con precipitaciones moderadas sin necesidad de utilizar una impermeabilización frente al agua.

En comparación con las construcciones típicas, los muros de balas de paja se terminan con acabados con gran permeabilidad. Estos muros tienen, dentro de unos límites, la capacidad de absorber humedad y evaporarla al exterior o al interior, aunque no se debe abusar de esta propiedad.

¹ CONFER - Canada Mortgage and Housing Corporation. Straw Bale Moisture Research [on line]. Canadá, 2000. [Consulta: 28 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.cmhc-schl.gc.ca>>

² CONFER - Canada Mortgage and Housing Corporation. Straw Bale House Moisture Research, op. cit.

CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

En el estudio no se apreció la descomposición de la paja que está en contacto con el enfoscado pero sí se encontraron casos preocupantes de descomposición de las balas en contacto con los suelos. De 12 muestras analizadas, dos estaban entre el 20% y el 30% de contenido de humedad pero las demás excedían el 45%, incluso llegando al 300%¹ en algún caso. Con valores de 300% de contenido de humedad se llegaba a apreciar agua en la pared. En todos los casos se observó alguna decoloración en la base de la pared, lo cual indicaba que se estaba empezando a descomponer la paja de estas zonas. Algunas balas incluso habían perdido volumen.



Fig. 9.22- Muestra de paja embalada de un muro en proceso de descomposición – Pilot study of moisture control in stuccoed straw bale walls – CMHC (1997)

En la imagen se puede observar una de las muestras tomadas para realizar la medición del contenido de humedad. La muestra se tomó en una zona muy próxima al suelo y en un muro que no estaba construido de forma que impidiera el ascenso de agua por capilaridad desde la zanja de cimentación. Por otro lado, la primera capa de recubrimiento que se le aplicó fueron unos 3-4 cm. de una mezcla de cemento, barro y paja troceada, pero el acabado final era de un mortero rico en cemento (impermeable al vapor de agua)². Con esta descripción no es de extrañar que la paja se observara en avanzado estado de descomposición, produciendo el mal olor propio de este proceso. Por supuesto, al medir el contenido de humedad, éste resultó ser muy superior al del punto de saturación.



Fig. 9.23- Muestra de paja embalada de un muro en coronación – Pilot study of moisture control in stuccoed straw bale walls – CMHC (1997)

En la segunda imagen se puede observar un caso totalmente distinto. La construcción tenía dos alturas y para la segunda planta se utilizaron unas vigas de madera apoyadas en la pared de balas de paja. Esta carga es la que causó el agrietamiento del recubrimiento que se puede ver en la parte derecha de la imagen. A diferencia del caso anterior, para este recubrimiento se utilizó una mezcla rica en cal. Esto, junto con la protección frente a la lluvia que le ofrece el voladizo, es la causa de que el contenido de humedad de la paja en este caso no supere el 13%³.

¹ Canada Mortgage and Housing Corporation. Straw Bale House Moisture Research, op. cit.

² Canada Mortgage and Housing Corporation. Pilot Study of moisture control in stuccoed straw bale walls [on line]. Canadá, 1997. [Consulta: 28 agosto 2006]. Disponigle en web: <<http://www.cmhc-schl.gc.ca>>

³ Canada Mortgage and Housing Corporation. Pilot Study of moisture control in stuccoed straw bale walls, op. cit.

CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

En Alberta, otra zona de estudio, 6 de las 9 estructuras analizadas mostraban lecturas de contenido de humedad aceptable, inferiores al 14%. Dos estructuras tenían un contenido de humedad que rozaba los límites aconsejables y la última presentaba un principio de descomposición debido a un fallo de diseño¹.

Como se ha podido comprobar hasta ahora, existen numerosos estudios acerca del comportamiento de los muros de balas de paja, aunque es necesario hacer muchos más, sobre todo del comportamiento en climas con elevadas precipitaciones y humedades relativas, que sería la situación más delicada. Aún así, se sabe que existen construcciones con balas de paja en climas duros como pueden ser Toronto (Canadá) o San Francisco (California) y que su comportamiento es bueno².

En este tipo de muros hay dos requisitos que se deben cumplir: evitar que el agua, fundamentalmente de la lluvia, penetre en la pared y permitir que la humedad que pueda tener la paja migre al exterior. Por esta razón no se deben utilizar impermeabilizaciones totales, ya que, con toda seguridad, producirán condensaciones y descomposición de la paja. Merece especial atención valorar la posibilidad de utilizar, en la cara externa del muro, una membrana permeable al vapor de agua e impermeable al agua. Sobre esta posibilidad se hablará con detalle en el apartado correspondiente a los acabados superficiales.

Es complicado, y no muy correcto, recomendar o desaconsejar este tipo de construcciones en un ambiente como el de Galicia, basándonos simplemente en los datos climatológicos. La realidad es que los valores de humedad relativa ambiental en nuestra comunidad son bastante elevados durante todo el año, resultando una media aproximada del 76%³. El mayor valor medio se alcanza en A Coruña con un 84%, seguida de Ourense con un 78% y Lugo y Pontevedra, que están rondando el 70%. Si a esto sumamos que la Humedad Relativa en el interior de las viviendas puede llegar a superar valores superiores al 85%, nos encontramos con una situación que no es la más idónea. Esto no significa que no se pueda construir en Galicia con balas de paja, sino, más bien, que habría que estudiar en detalle su comportamiento en este clima y analizar soluciones constructivas más aconsejables para su buen comportamiento. No obstante, existe el precedente de construcciones realizadas con balas de paja en lugares como Toronto o San Francisco y con buenos resultados. Algunos de sus datos climatológicos se indican a continuación.



Fig. 9.24- Ubicación geográfica de la estación meteorológica de Santiago de Compostela – Xunta de Galicia, op. cit.

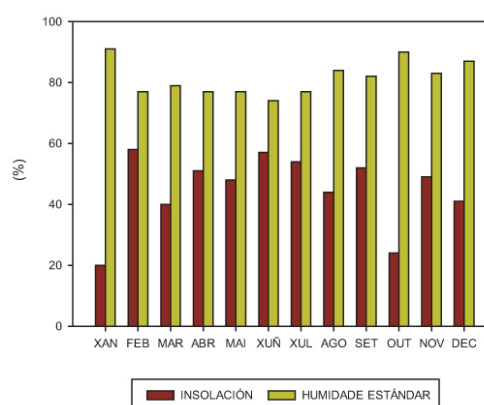


Fig. 9.25- Gráfica de Humedad Estándar e Insolación en la zona de Santiago de Compostela en el año 2004 – Xunta de Galicia, op. cit.

¹ Canada Mortgage and Housing Corporation. Straw Bale House Moisture Research, op. cit.

² Conversación mantenida con John Straube

³ Xunta de Galicia – Consellería de Medio Ambiente. Anuario Climatolóxico de Galicia 2004. 118 p. ISBN: 84-453-3962-1



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

Toronto, Notario (Canadá)												
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Temp. media	-6	-5	-	6	12	17	21	20	15	8	3	-2
H.R. media (%) (mañana)	83	83	82	78	76	78	79	86	89	87	86	84
H.R. media (%) (tarde)	76	73	68	58	55	54	54	57	61	65	74	78

Tabla 9.3- Datos climatológicos de Toronto [Canty and Associates LLC, Webmaster]

San Francisco (California)												
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Temp. media	10	12	12	13	14	15	15	16	17	16	14	11
H.R. media (%) (mañana)	81	83	81	82	89	89	92	93	87	81	82	80
H.R. media (%) (tarde)	63	63	61	61	68	72	74	73	66	60	63	63

Tabla 9.4- Datos climatológicos de San Francisco [Canty and Associates LLC, Webmaster]

En el siguiente apartado se analizará el estudio de monitorización de las paredes de una bodega construida con balas de paja en California, pero vamos a mencionar ahora algún dato que podamos comprobar con la climatología de nuestra zona.

Según datos facilitados personalmente por John Straube¹ de la University of Waterloo, uno de los factores, entre tantos otros, que se midió en este estudio fue la Humedad Relativa exterior. El estudio tuvo una duración aproximada de un año y los valores de los sensores se registraban cada hora. De esta forma tenemos 9.339 valores para analizar la Humedad Relativa exterior.

La bodega está situada en una zona seca con grandes oscilaciones térmicas a lo largo del día. Esto provoca que la HR exterior llegue a superar muchas veces el 100% y, de hecho, el promedio de todos los datos obtenidos da como resultado una Humedad Relativa del 81,03%. Hay que decir que, al tratarse de una bodega, la intención era la de mantener la Humedad interior en un 80% de forma constante. Estos valores pueden parecer excesivos para el buen comportamiento de las balas de paja, pero la conclusión que se extrae de los datos obtenidos por los sensores colocados en las paredes es que no es tanto así. También es cierto que la mejor forma de comprobarlo es analizando el estado de las paredes dentro de unos años pero, de momento, los datos no son preocupantes.

¹ John Straube – Associate professor – Dept. of Civil Engineering & School of Architecture – University of Waterloo - Canada



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

9.7 Monitorización del comportamiento higrotérmico de paredes de balas de paja

9.7.1 Descripción del estudio

Con el objetivo de encontrar posibles usos para la gran producción de paja, el Estado de California inició un programa de investigación para mejorar el nivel de conocimientos científicos sobre el comportamiento y el rendimiento de las paredes de balas de paja. Una bodega de California, interesada en la construcción sostenible, encargó la construcción de un edificio de balas de paja para la elaboración y almacenaje de los vinos y, además, se ofreció para participar en un exhaustivo programa de monitorización de los muros.

El edificio tiene forma de “U” y con el lado abierto de la U orientado al Norte. El espacio destinado a barriles está especialmente acondicionado para mantener una temperatura aproximada de unos 15°C con una Humedad Total del 80%. Éstas son unas condiciones bastante diferentes a las normales de un espacio habitable. Aún así se pudo hacer el estudio en diferentes ambientes ya que también se monitorizó un local destinado a las catas, local que no necesitaba esta elevada humedad.



Fig. 9.26- Vista de la esquina sureste de la bodega en la puerta principal [John Straube and Chris Schumacher. Monitoring the Hygrothermal Performance of Strawbale Walls, 2003]

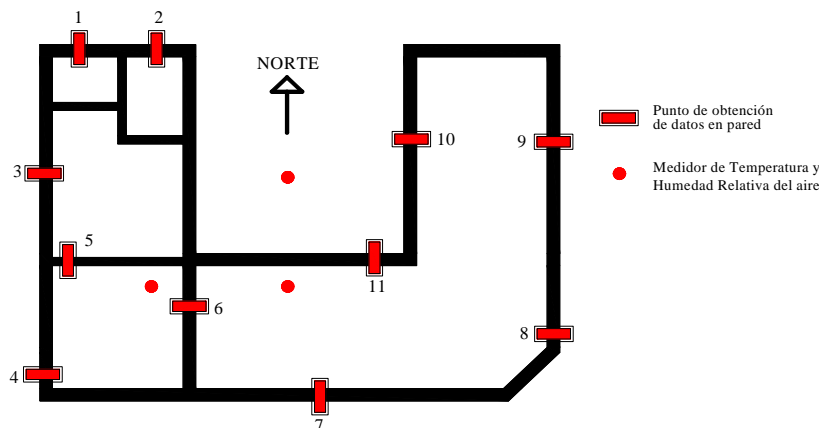


Fig. 9.27- Localización de los sensores en planta [John Straube and Chris Schumacher. Monitoring the Hygrothermal Performance of Strawbale Walls, 2003]

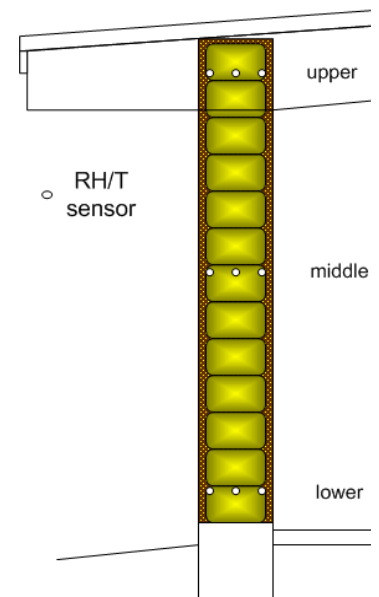


Fig. 9.28- Localización de los sensores en sección [John Straube and Chris Schumacher. Monitoring the Hygrothermal Performance of Strawbale Walls, 2003]

CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

Se seleccionaron un total de 13 puntos de interés para la toma de datos en las paredes del edificio. La mayor parte de éstos estaban en paredes exteriores, pero alguno también estaba en paredes interiores que separaban distintos ambientes. Lo que se hacía en estos puntos era tomar datos de Temperatura y Humedad Relativa en las partes alta (U), media (M) y baja (L) del muro, así como en las zonas interior (I), intermedia (N) y exterior (E) de éste. De esta



Fig. 9.29- Sensor de Temperatura y Humedad Relativa instalado en la pared de balas de paja [John Straube and Chris Schumacher. Monitoring the Hygrothermal Performance of Strawbale Walls, 2003]

forma, un total de nueve sensores ofrecían datos de la misma zona pero a distintas alturas y profundidades. Los sensores son bastante pequeños y tienen una buena precisión ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ y $\pm 2\%$ HR) y un precio económico.

Las condiciones interiores se midieron en la zona destinada a los barriles y en la zona de catas. En el exterior, una estación meteorológica medía Temperatura, Humedad Relativa, velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar y precipitación.

Todo el cableado de los sensores se condujo a dos sistemas de almacenamiento de datos como el que se ve en la imagen. Para el informe se analizaron los datos obtenidos entre el 1 de Junio de 2002 y el 5 de Julio de 2003, un período de 400 días.



Fig. 9.30- Sistema de almacenamiento de datos del local destinado a barriles [John Straube and Chris Schumacher. Monitoring the Hygrothermal Performance of Strawbale Walls, 2003]



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

9.7.2 Resultados

Los datos correspondientes a los sensores del muro junto con las condiciones interiores y exteriores se representan en los gráficos que se muestran a continuación. No aparecen todos los gráficos del informe, pero sí se examinan con detalle los de algunas zonas, a diferentes escalas para explicar con mayor claridad ciertos aspectos del comportamiento.

Nomenclatura

Se ha desarrollado un sistema de códigos de los sensores para organizar la función del sensor y su localización. Este código está compuesto por 4 caracteres que se explican a continuación.

- posición en planta: del 1 al 16
- altura: U- arriba, M- media altura y L- abajo
- profundidad: E- exterior, N- intermedio e I- interior
- función: H- Humedad y T- Temperatura

Por ejemplo, un sensor denominado 8MEH está situado en la zona número 8 (pared Este, al lado de la puerta de entrada), a media altura, en la cara exterior de la paja (debajo del recubrimiento) y mide la humedad relativa. El eje de la izquierda representa el porcentaje de Humedad Relativa y el de la derecha la Temperatura en °C.

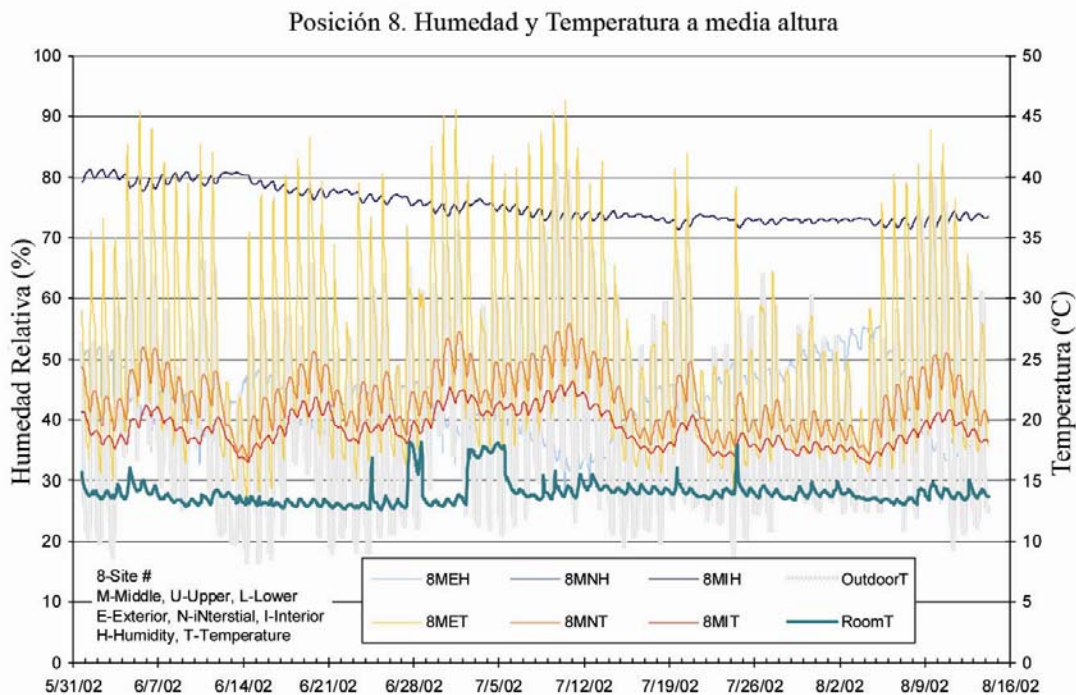


Fig. 9.31

La humedad relativa es alta cerca de la superficie interior (80%), pero poco a poco va descendiendo hasta un 75%. Este período corresponde al de evaporación de la humedad de construcción, ya que esta aún era reciente. La Humedad Relativa dentro de la pared (N) y en el exterior (E) es más baja, entre un 45% y un 55%.

Se pueden observar más detalles representando un período de tiempo más corto como el del gráfico siguiente.





CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

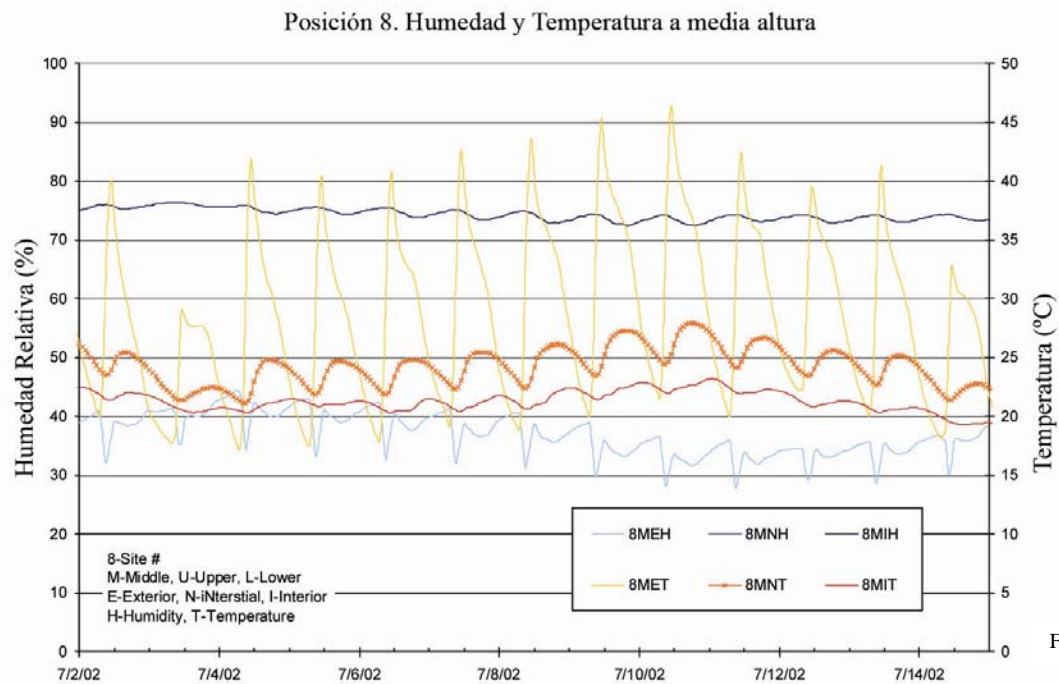


Fig. 9.32

La temperatura bajo la capa de recubrimiento exterior (8MET) a media altura suele aumentar rápidamente por la mañana, llegando a los 40°C a las 11:00 a.m. Esto es debido al sol de la mañana que calienta este lado del edificio. Por la tarde, el sol cambia de posición y esta temperatura se reduce. La temperatura bajo la capa de recubrimiento interior (8MIT) es mucho más baja y más estable. Se mantiene en torno a los 20°C y con una variación durante el día de menos de 1°C. La temperatura en el medio de la pared varía entre 20°C y 25°C, manteniéndose por encima de la exterior (en algún momento) y de la interior a causa de la exposición solar.

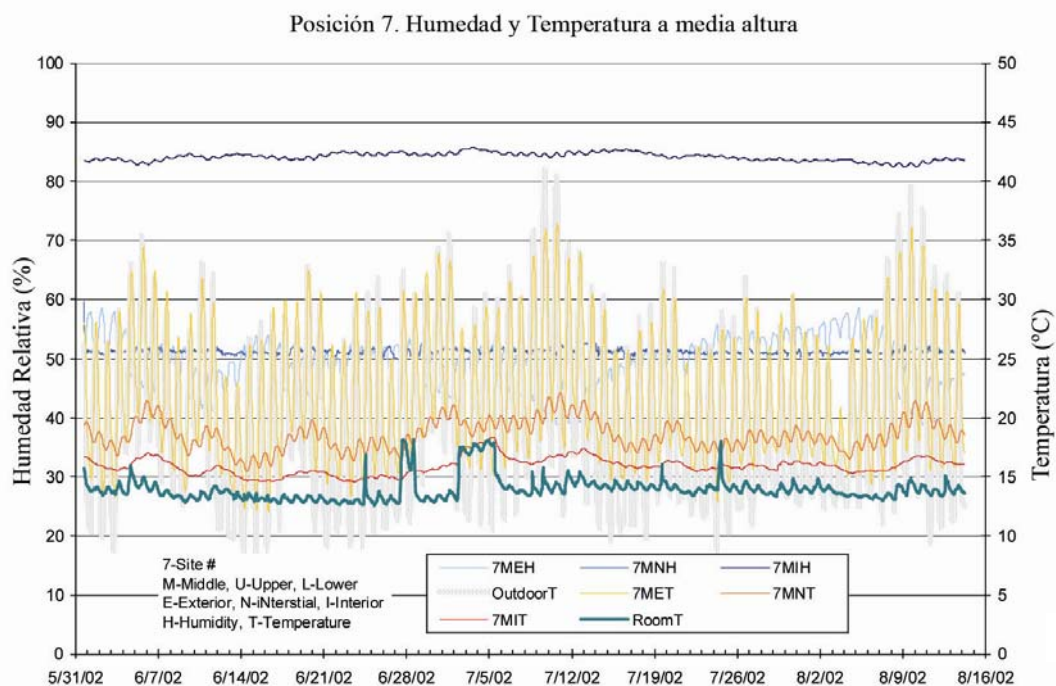


Fig. 9.33





CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

La sombra y el elevado ángulo que forma el sol con la horizontal en el lado sur evitan, aparentemente, la exposición directa en el exterior y a media altura en este período, ya que el sensor 7MET permanece por debajo de la temperatura exterior y alcanza el máximo a las 5 o 6 de la tarde. La Humedad Relativa en el exterior y dentro de la pared son superiores a las de la cara Este, pero aún así permanecen por debajo del 55% casi todo el tiempo.

La temperatura de la cara interior es unos 3°C más baja que en el lado Este, debido a que en el lado sur es donde están apilados los barriles de vino. Además, en este caso se llegó a medir una HR en la cara interior del 85%, lo que llevó a recomendar una reducción de la HR interior pensando en la protección de la pared.

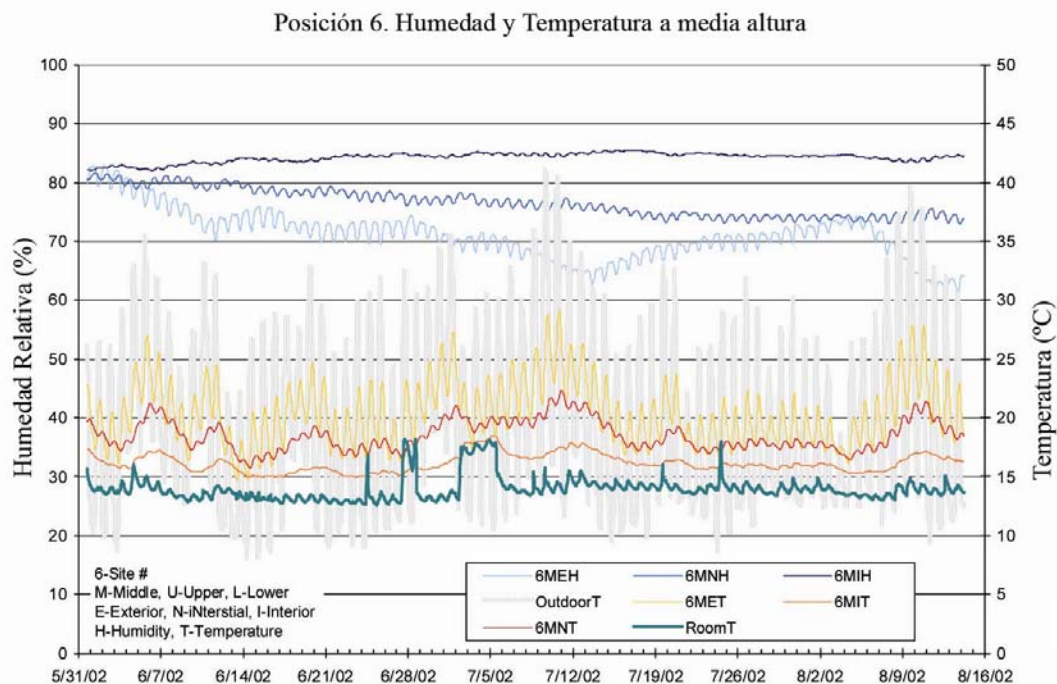
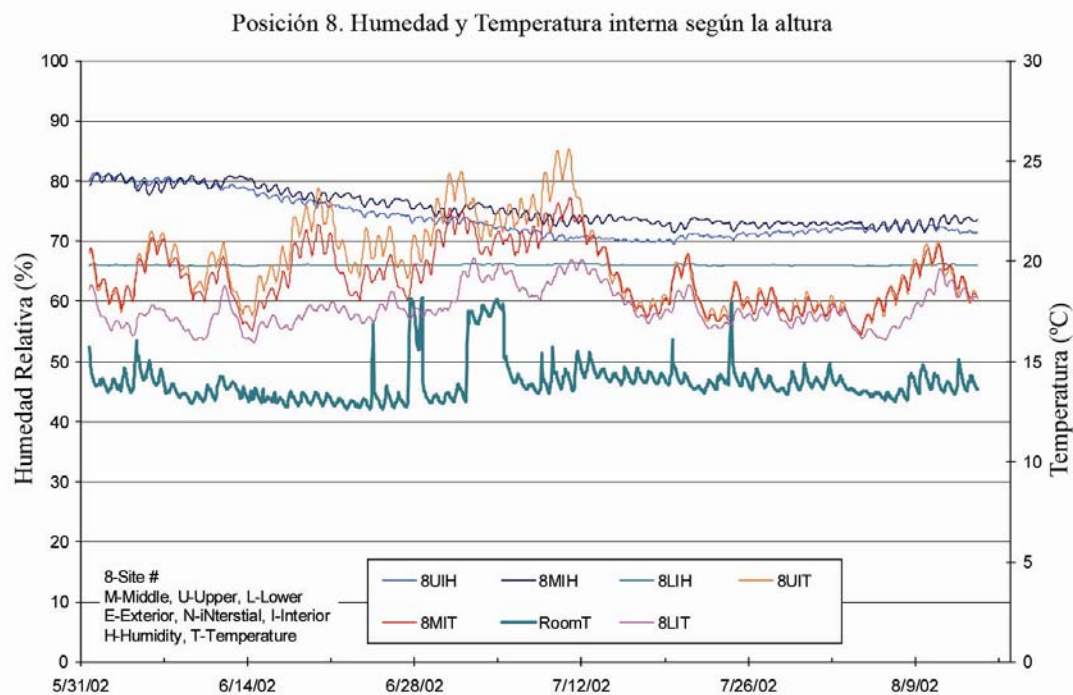
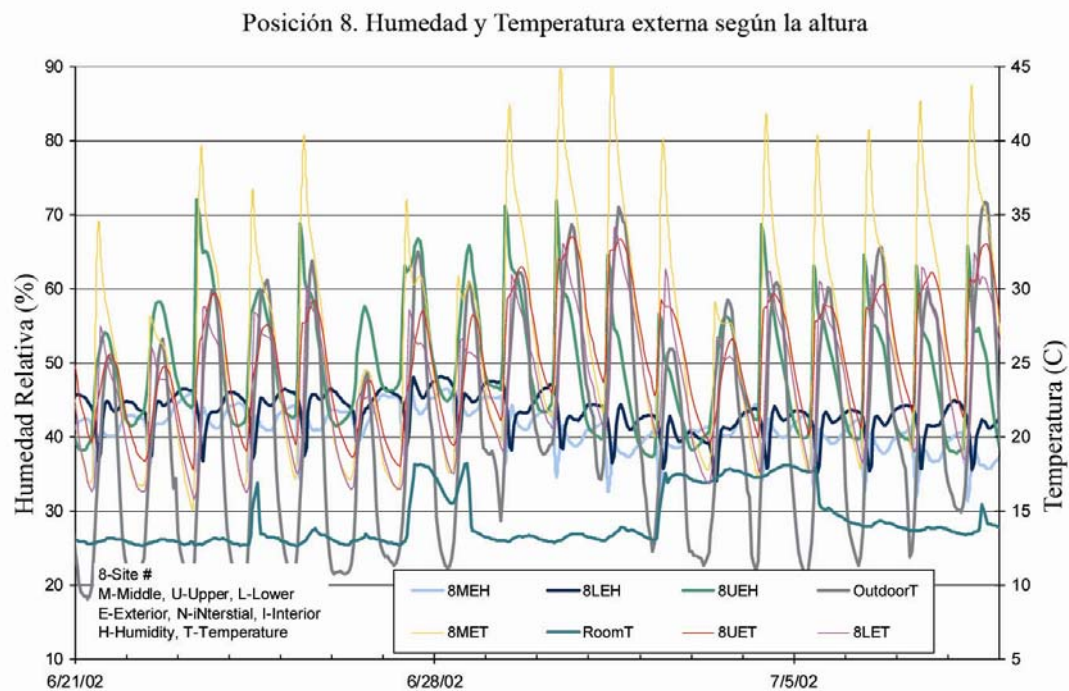


Fig. 9.34

Esta gráfica representa los valores de la única pared que separa la zona destinada a almacenar los barriles de la zona de catas. Al final del período que representa la gráfica, ambas caras están acondicionadas, mientras que al principio, la zona de catas tenía unas condiciones de humedad y temperaturas más propias de la cara exterior. No existen grandes oscilaciones de temperatura y la Humedad Relativa en la superficie del lado del almacén de barriles es superior al 85% y en el opuesto en torno al 70%. En la superficie del lado de la zona de catas se produjo una reducción de la humedad en el verano, mientras que en la del otro lado aumentó a medida que aumentaba la HR del almacén.



Variaciones en altura



Con estos dos gráficos se pueden estudiar, con mayor detalle, las variaciones de humedad y temperatura en función de la altura a la que se tomen los datos.

Los sensores UIT, MIT, UIH y MIH indican que las situaciones altas y medias son muy parecidas, tanto para Humedad Relativa como para Temperatura. El sensor LIT marca una temperatura inferior a la de



CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

las posiciones superior e intermedia, reflejando la pérdida de calor a través del suelo. El sensor LIH se estima que está estropeado porque permanece prácticamente estable.

Los sensores MEH y LEH son casi idénticos mientras que el UEH es mucho más variable.

La variación exterior de temperatura sugiere que el sensor de media altura es el que refleja temperaturas más cálidas, mientras que los de las partes alta y baja muestran datos de menor temperatura. En el caso del sensor situado en la parte elevada, este descenso de temperatura es debido a que la zona está protegida frente al sol por medio del alero de la cubierta.

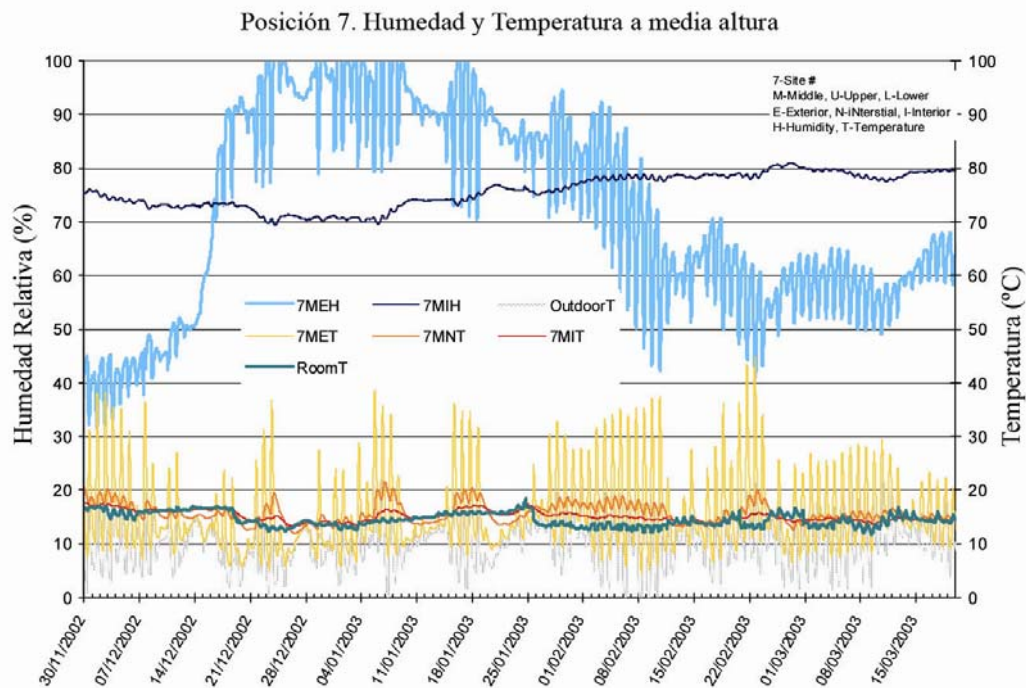


Fig. 9.37

Respuesta ante la lluvia

Los aleros de la cubierta ofrecen cierta protección frente a la lluvia. A pesar de esto, las paredes fueron salpicadas por el agua, mostrando un buen comportamiento ante este fenómeno. Un ejemplo de esta exposición a la lluvia es la posición 7 justo antes de las Navidades de 2002. Los datos obtenidos mostraron intensas lluvias y fuertes vientos del sur. La Humedad Relativa en la cara exterior aumentó rápidamente hasta casi el 100%, bajó al 80% en las siguientes 6 semanas y regresó al equilibrio 8 o 9 semanas después. La Humedad Relativa en la cara interior aumentó un poco, pero de forma casi inapreciable.

Este sensor muestra que el muro se seca de una forma natural. El sensor de la parte baja muestra un comportamiento similar pero no es así en el caso del de la parte superior, porque está protegido por el voladizo y casi no se moja.





CAPÍTULO 9 – COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO

9.7.3 Conclusiones

La monitorización de las paredes de la bodega resultó exitosa. Se recogieron grandes cantidades de datos.

Las temperaturas varían rápidamente durante el día en las capas externas de los muros de balas de paja y cuando están expuestas al sol están dominadas por sus efectos. El sol puede elevar su temperatura, incluso 20°C por encima de la temperatura exterior. La temperatura bajo la capa de recubrimiento interior es bastante estable a causa del gran aislamiento térmico que tienen las balas de paja.

La Humedad Relativa dentro de las paredes varía lentamente en la mayoría de los casos, pudiendo llegar a durar semanas el proceso. Esto es debido a la capacidad de estos muros para almacenar humedad. Los incrementos repentinos de este valor suceden cuando el muro está expuesto a la lluvia, que causa los mayores y más rápidos incrementos en la HR. El secado de las paredes puede suceder de forma rápida si las condiciones lo permiten, pero si la lluvia ha sido mucha, puede llegar a necesitar de 4 a 8 semanas para secarse.

La segunda causa más importante del contenido de humedad es la Humedad Relativa. En el caso de la bodega, la elevada Humedad Relativa interior producía niveles elevados de la misma en la pared.



Capítulo 10

COMPORTAMIENTO ACÚSTICO



CAPÍTULO 10 – COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

10.1 Introducción

Las estructuras convencionales suelen depender de una elevada masa para conseguir un aislamiento acústico efectivo, especialmente en el rango de frecuencias bajas. Es fácil impedir la transmisión del canto de un pájaro, pero resulta más difícil conseguir esto con el sonido de la bocina de un camión. Pero existe otra forma de conseguir un buen aislamiento acústico, y ésta consiste en una estructura tipo sándwich conformada por dos membranas, no muy rígidas pero con suficiente masa, y un núcleo de material muy poroso.

Las propiedades acústicas de las balas de paja no son el principal motivo por el que proliferan las construcciones que utilizan este material pero, con el tiempo, se ha podido comprobar que son una cualidad muy importante de éstas.

Existen dos estudios de grabación en los Estados Unidos que han sido contruidos con balas de paja por las características acústicas que esta tiene. Sistemas de muros de paja también han sido utilizados como barreras sónicas cerca de aeropuertos y autopistas de EEUU y Europa¹.

10.2 Análisis técnico

El aislamiento acústico (R), la medida de la energía sonora que se transforma durante la transmisión del sonido a través de los materiales, fue medido en una pared de balas de paja con mortero de recubrimiento y 51 cm. de espesor total². El resultado para esta prueba fue de R=59,8 dBA. Este valor puede ser equiparable al de un muro de hormigón armado de 24 cm. de espesor que aísla 60 dBA. Para el ensayo se utilizó una pistola de atletismo como fuente de energía, porque su explosión crea una elevada energía sonora que abarca las frecuencias a las que el oído humano es sensible (20-20.000 Hz). Durante la prueba, la pistola estaba aislada con la intención de que el sonido creado por la explosión se desplazara en la dirección de la pared hasta el micrófono. Para aislar el emisor y el receptor de sonido, se construyeron unas cajas de madera contrachapada de entre 3 y 4 pulgadas y sus paredes fueron recubiertas con un material absorbente acústico.

La eficacia de las balas de paja para absorber el sonido se midió en una habitación aproximadamente cúbica de paredes de ladrillo³. Se midió el tiempo de reverberación de la habitación antes y después de incorporar 10 balas de paja. La cantidad de sonido absorbido en la habitación aumentaba (el tiempo de reverberación disminuía) con la incorporación de la paja. Los tiempos de reverberación se midieron a 125 Hz., 250 Hz., 1000 Hz., y 4000 Hz., ofreciendo una medida cuantitativa de la absorción sonora.

En Dinamarca, en el año 2001, Dan Brosted Pedersen (ingeniero civil) también realizó ensayos de medición de aislamiento acústico en una vivienda construida con balas de paja. Las balas que habían sido utilizadas en la construcción tenían unas dimensiones de 800 mm x 450 mm x 380 mm. y cada una pesaba entre 12 y 14 Kg. Esto suponía una densidad de entre 88 y 102 Kg, que es una densidad baja. En algunas zonas las balas estaban colocadas en posición horizontal, mientras que en otras lo estaban en posición vertical, por lo que se ensayaron ambas situaciones y a distintas frecuencias. En ambos casos existía un

¹ CONFER – Barbara Johnes, op. cit.

² Carl J. Mas y E. Carr Everbach. Acoustical Characterization of Straw Bales as Structural Elements [on line]. St. Louis, Missouri. Acoustical Society of America, 1995. [Consulta: 6 septiembre 2006]. Disponible en web: <<http://www.asa.aip.org>>

³ Carl J. Mas y E. Carr Everbach, op. cit.





CAPÍTULO 10 – COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

recubrimiento de unos 4 cm. de arcilla a cada lado de la pared. Los resultados obtenidos de aislamiento acústico (R) se presentan en las siguientes tablas y gráficas.

Este primer caso corresponde a una pared con balas colocadas en sentido vertical y con un espesor total después del acabado superficial de 46 cm.

Frecuencia f (Hz)	Aislamiento R (dB A)
100	33,8
125	38,8
160	41,2
200	42,2
250	43,8
315	38,6
400	42,4
500	40,5
630	42,9
800	43,9
1000	45,8
1250	46,8
1600	49,6
2000	52,2
2500	53,7
3150	56,4

Tabla 10.1 [Dan Brosted Pedersen. Maling af luftlydisolation for lerpudsede halmaegge i ejedom beliggende Kordalsvej 16, 9493 Saltum. On line. Junio de 2001]

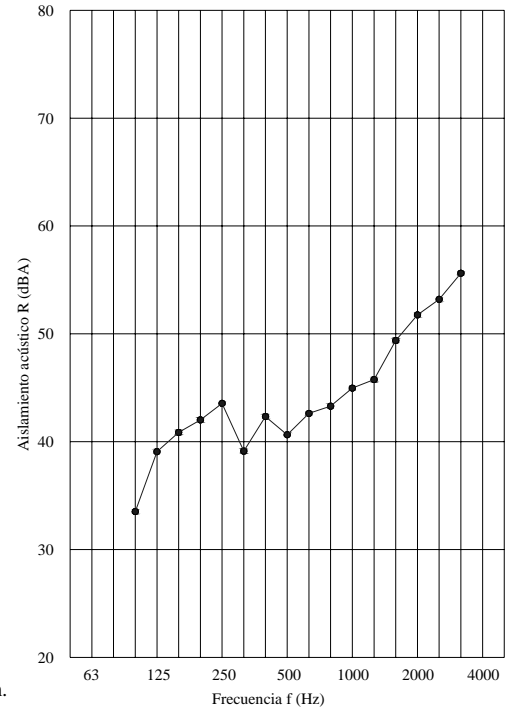


Fig. 10.1 [Dan Brosted Pedersen. Maling af luftlydisolation for lerpudsede halmaegge i ejedom beliggende Kordalsvej 16, 9493 Saltum. On line. Junio de 2001]

Este segundo caso es el correspondiente a una pared con balas de paja colocadas en sentido horizontal. El espesor total de pared es de 53 cm.

Frecuencia f (Hz)	Aislamiento R (dB A)
100	34,1
125	34,0
160	35,9
200	37,1
250	38,8
315	45,0
400	48,4
500	49,1
630	50,9
800	52,1
1000	54,4
1250	57,5
1600	57,9
2000	60,8
2500	62,7
3150	62,5

Tabla 10.2 [Dan Brosted Pedersen. Maling af luftlydisolation for lerpudsede halmaegge i ejedom beliggende Kordalsvej 16, 9493 Saltum. On line. Junio de 2001]

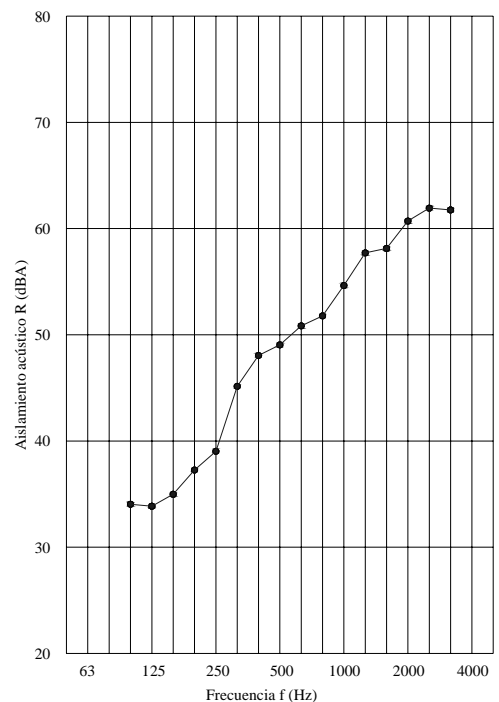


Fig. 10.2 [Dan Brosted Pedersen. Maling af luftlydisolation for lerpudsede halmaegge i ejedom beliggende Kordalsvej 16, 9493 Saltum. On line. Junio de 2001]



CAPÍTULO 10 – COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

A partir de los datos obtenidos en este ensayo, se concluyó que el valor de aislamiento acústico (R) para la pared de 46 cm. de espesor era de 46 dBA y para la de 53 cm. de espesor era de 52 dBA.

Un ensayo menos formal fue llevado a cabo por John Glassford en 1999 en un estudio de grabación de Sydney. Este estudio tenía paredes de balas de paja de 45 cm. de espesor con un recubrimiento de 1 cm. de yeso por cada cara. Tenía puertas para comunicar las distintas estancias, pero no tenía ventanas y la ventilación se producía con el aire acondicionado. Una primera medición en el interior del estudio con un volumen de música muy elevado dio como resultado una lectura de 114-117 dBA. Con la misma cantidad de sonido dentro del habitáculo, se realizó la medición sonora en el exterior y esta fue de 62 dBA. Esto supone un aislamiento acústico (R) de entre 52 y 55 dBA.

En el año 2003 Jasper Van der Linden, un estudiante de ingeniería de la construcción de la Eindhoven Technical University (Holanda), ensayó una pared con recubrimiento de barro según la norma ISO 140-3 para comprobar el nivel de atenuación acústica. Las balas empleadas eran de dos cuerdas, con un ancho de 46 cm, y fueron colocadas en sentido horizontal. Su densidad era de entre 120 y 130 Kg/m³ y el recubrimiento que se le aplicó tenía un espesor de 25 mm en una de las caras y de 35 mm en la otra. Como conclusión del ensayo, el nivel de atenuación acústica fue de 53 dBA¹.

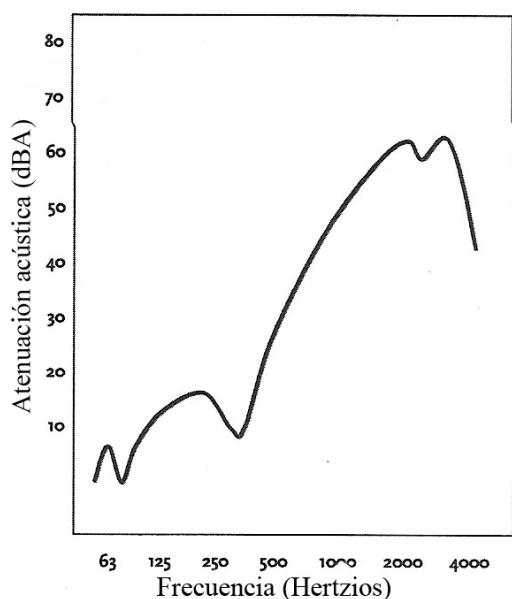


Fig. 10.3- Gráfica comparativa de resultados de una pared de balas de paja con recubrimiento y una de hormigón de 10 cm de espesor. [Bruce King con René Dalmeijer. Design of straw bale buildings]

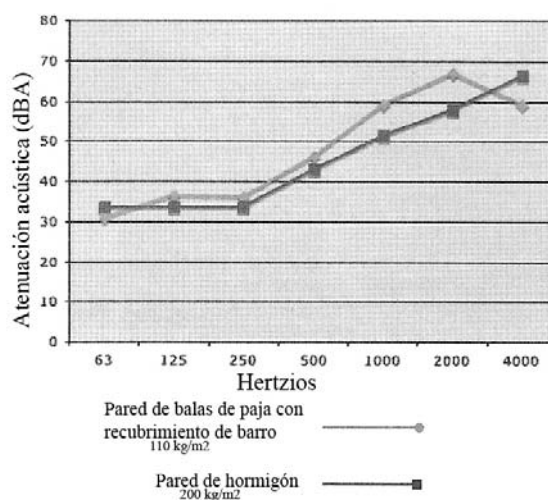


Fig. 10.4- Resultados del ensayo de condiciones acústicas en la Universidad de Eindhoven. [Bruce King con René Dalmeijer. Design of straw bale buildings]

¹ Bruce King with René Dalmeijer. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7



CAPÍTULO 10 – COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Resumen de valores de atenuación acústica

- Año 1995 (Carl J. Mas)

Balas de paja con recubrimiento de mortero de composición desconocida

Espesor total de pared de 51 cm.

R= 59,8 dBA

- Año 1999 (John Glassford)

Balas de paja de 45 cm. de espesor

Recubrimiento de 1 cm. de yeso

R= 52-55 dBA

- Año 2001 (Dan Brosted Pedersen):

Configuración N°1:

Balas colocadas en vertical. Espesor total de pared 46 cm.

Recubrimiento de 40 mm. de barro.

R= 46 dBA

Configuración N°2:

Balas colocadas en horizontal. Espesor total de pared de 53 cm.

Recubrimiento de 40 mm. de barro.

R= 52 dBA.

- Año 2003 (Van der Linden)

Balas de 46 cm. de espesor colocadas en horizontal

Recubrimiento de barro de 25+35 mm.

R: 53 dBA

10.3 Conclusiones del análisis técnico

Las paredes de balas de paja absorben muy bien el sonido por lo que el simple hecho de intentar hablar con una persona que esté del otro lado de una pared se hace realmente difícil. Debido a la forma en la que están constituidas las balas, la energía de las ondas sonoras no puede hacer vibrar un muro construido con éstas. El relativamente bajo nivel de rigidez de una pared de balas de paja recubierta con barro es ideal. La elasticidad del núcleo de paja entre las dos membranas de recubrimiento proporciona una excelente atenuación acústica. Si no se les aplicara ningún acabado superficial, incluso funcionarían como absorbentes acústicos gracias a la superficie que presenta este formato. Estos recubrimientos que se le aplican sí pueden ser afectados por las ondas sonoras, pero esas vibraciones que se puedan producir serán absorbidas por el núcleo elástico de paja. Su nivel de atenuación acústica está en torno a los 50 dBA.





CAPÍTULO 10 – COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Las paredes de balas de paja, además de tener elevadas cualidades de aislamiento térmico, ser baratas y producir un mínimo impacto ambiental, tienen la capacidad tanto de impedir la transmisión de energía sonora como de absorber el sonido en un amplio intervalo de frecuencias. Es por este motivo que, incluso, han llegado a ser utilizadas en las cercanías de los aeropuertos o de las autopistas.

Algún propietario¹ de vivienda de balas de paja con el que se han mantenido conversaciones durante el proceso de investigación para este estudio llegó a decir: *“algunas veces es necesario que abra las ventanas para darme cuenta de que el mundo exterior está ahí”*.



Fig. 10.5- Pieza del equipo utilizado para determinar el grado de aislamiento acústico de una pared de balas de paja – S-HOUSE (Strawbale House)
[GrAT – Center for Appropriate Technology / Viena University of

¹ Lluís Miró Besó, Juneda (Lleida)

Capítulo 11

RESISTENCIA AL FUEGO



CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

11.1 Introducción

Los muros de balas de paja debidamente enfoscados pueden tener menos peligro ante el fuego que los muros de las típicas viviendas con estructura de madera de EEUU. Se han hecho ensayos de resistencia al fuego según las normas ASTM en dicho país con resultados satisfactorios¹.

Las distintas normativas existentes definen la seguridad de las paredes frente al fuego como “resistencia” al fuego. En el caso de elementos compartimentados, antiguamente se denominaba RF mientras que el actual CTE la denomina EI. En el caso de elementos estructurales se designaba con las siglas EF, mientras que ahora es R. En el caso de elementos compartimentados, la resistencia al fuego representa el tiempo (expresado en minutos) que un fuego puede existir en un lado de la pared antes de que se transmita el calor suficiente como para incendiar los materiales del otro lado, incluso si el fuego no ha traspasado la pared.

La resistencia al fuego es, aparentemente, el principal problema que tienen las construcciones con balas de paja. Es una equivocación pensar que, como la paja suelta arde con bastante facilidad, puede suceder lo mismo con una pared construida con balas de paja. Desmentir esta creencia ha sido uno de los motivos por los que se han realizado varios ensayos de resistencia al fuego sobre este material, algunos de los cuales se describen a continuación.

11.2 Análisis técnico

Una vez que la superficie de una bala de paja o de una pared de balas de paja se ha carbonizado, lo peor que puede suceder es que arda muy lentamente sin llama. Esta resistencia a la rápida combustión se ha observado durante algún fuego accidental que se ha producido durante la construcción de paredes de balas. También se apreció durante un ensayo de laboratorio llamado “corner test”, en balas de paja sin recubrimiento en el *Richmond Field Station* de la Universidad de California, en Marzo de 1996². Este ensayo consistía en incendiar una papelera con papeles y comprobar el comportamiento de la pared de balas de paja en la esquina próxima a la papelera. La superficie se carbonizó rápidamente pero después de esto no se observó ningún efecto. Una vez que el ensayo terminó, se procedió a retirar las balas de la pared y en ese momento las chispas que habían alcanzado el interior de la pared obtuvieron el oxígeno suficiente para producir llama.

Una situación más complicada tiene lugar cuando las balas se colocan en posición vertical y, por lo tanto, las cuerdas que producen la fuerza de compresión de la bala se encuentran en la superficie de la pared. Como esta situación sólo es temporal, mientras que se realiza la construcción, lo verdaderamente importante es saber si las cuerdas quedan suficientemente protegidas con el acabado exterior y, en caso de que no lo estén y se derritan bajo el acabado, cómo se comportará la pared una vez que esto haya ocurrido. En un estudio realizado en el año 2006, que se detallará más adelante, se comprobó que las balas de paja tenían un buen comportamiento en esta posición.

¹ CONFER – Barbara Johnes, op. cit.

² CONFER – Bob Theis. Straw Bale Fire Safety [on line]. Julio de 2003. [Consulta: 18 agosto 2003]. Disponible en web: <<http://www.ecobuildnetwork.org>>





CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

Pruebas de laboratorio realizadas

En general, una vez que el muro ha sido recubierto por ambas caras, la combinación de una superficie incombustible y un interior aislante que ni arde bien ni se derrite hace que la pared de balas de paja tenga un buen comportamiento frente al fuego. Esto ha sido comprobado en varios ensayos de laboratorio, algunos de los cuales se citan a continuación.

1. Año 1986. Louis Gagné Rupert realizó en Québec (Canadá) un ensayo que formaba parte del Project Implementation Division Policy Research and Programs Sector Canada Mortgage and Housing Corporation. Después de 240 minutos de ensayo y de haber alcanzado los 1102,8°C, se comprobó que la temperatura de la cara opuesta se había elevado en 39,5°C. En las próximas páginas veremos con detalle los datos¹.

2. Año 1993. El SHB Agra lab en Sandia, Nuevo México, realizó dos ensayos de resistencia al fuego según la norma ASTM E-119². Uno se realizó en una pared con acabado superficial y otro en una sin este acabado y ambos demostraron un buen comportamiento al fuego. La pared que no tenía recubrimiento resistió el calor y las llamas durante 30 minutos, hasta que las llamas penetraron por una junta entre balas. La otra pared tuvo un comportamiento, como es lógico, mucho mejor llegando a los 120 minutos. Este ensayo será también analizado con más detalle en páginas posteriores.

3. Año 1996. En la Universidad de *California Richmond Field Station* se realizó otro ensayo de resistencia al fuego según la norma ASTM E-119, del que se obtuvo una Resistencia al Fuego de la pared de 60 minutos³. Este fue el dato oficial que se determinó pero, según palabras de R. Brady Williamson, un experto allí presente, la pared probablemente podría haber soportado los 120 minutos.

4. Año 2001. El GrAT (Appropriate Technology Group), en el *Viena Technical Institute*, realizó también otro ensayo similar al ASTM E-119 con un resultado de una Resistencia al Fuego de 90 minutos⁴.

5. Año 2001. El *Danish Fire Technical Institute* ensayó una pared de balas de paja con recubrimiento. En el lado de la fuente de calor se alcanzaron los 1000°C después de 30 minutos de ensayo y en este tiempo la temperatura de la otra cara se había incrementado 1°C. El mayor incremento de temperatura permitido para superar el ensayo era de 80°C⁵.

6. Año 2002. Bohdan Dorniak y miembros del AUSBLE ensayaron de forma individual balas de paja con recubrimiento⁶. Las sometieron a un calor de una intensidad de 29 kilovatios/m² y no se incendiaron ni desarrollaron grietas visibles. Según el *Australian Bushfire Code AS 3959*, esto clasifica el material como no combustible.

¹ CONFER - Bob Theis, op. cit.

² CONFER - Bob Theis, op. cit.

³ CONFER - Bob Theis, op. cit.

⁴ CONFER - Bob Theis, op. cit.

⁵ CONFER - Bob Theis, op. cit.

⁶ CONFER - Bob Theis, op. cit.





CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

7. Año 2006. En los *Intertek Laboratories* de San Antonio, Texas, se realizaron dos ensayos en dos paredes de distinta configuración, mostrando resistencias al fuego de 60 y 120 minutos. Los ensayos se hicieron según la norma ASTM E119¹.

Propagación de la llama y densidad del humo

En el año 2000, Katrina Hayes realizó un ensayo de este tipo a balas de paja sin recubrimiento en los *Omega Point Laboratories*, siguiendo la norma ASTM E84-98². Consistía en determinar el comportamiento de este material ante el fuego observando la propagación de la llama y la densidad del humo producido. La muestra ensayada tenía 46 cm de espesor y 7,34 metros de longitud. Las balas utilizadas para el ensayo eran de 46 x 97 x 36 cm y el recubrimiento estaba reforzado por una malla de acero galvanizado³. Se expuso al fuego durante 10 minutos mientras que se obtenían datos de propagación de llama en la superficie y de densidad de humo. El *Uniform Building Code* permitía una propagación de llama de no más de 25 y en el ensayo se obtuvo un resultado de 10, además de que la densidad del humo no debía ser superior a 450 y el resultado fue de 350⁴. El informe del ensayo omite las unidades en que están expresados estos valores.

Casos reales

Bob Theis, en el informe que publicó para el EBN en 2003, incluye 14 casos de fuego en las construcciones de balas de paja, tanto antes como después de la construcción. Las consecuencias de estos fuegos abarcan desde el avance de las llamas a lo largo de la paja suelta por la pared hasta la pérdida total de la estructura. Las causas de los fuegos fueron las siguientes:

- Caída de velas (2 casos).
- Fuego de las chimeneas (1 caso).
- Estufa eléctrica portátil (1 caso).
- Incendios provocados (1 caso).
- Cortocircuitos eléctricos (3 casos).
- Actividad de la construcción (6 casos).

Estos datos indican que el mayor peligro de incendio reside en el proceso constructivo.

11 fuegos se produjeron durante la construcción. De ellos,

6 provocaron un daño local

5 provocaron la pérdida total

3 fuegos se produjeron después de habitadas las viviendas. De ellos,

2 provocaron un daño local

¹ CONFER – Bruce King con Bob Theis. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7

² CONFER - Bob Theis, op. cit.

³ Katrina Hayes. ASTM E84 – 98 Standard Test Method for SURFACE BURNING CHARACTERISTICS OF BUILDING MATERIALS [on line]. EEUU, mayo de 2000. [Consulta: 18 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalebuilding.ca>>

⁴ Bob Theis, op. cit.





CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

1 provocó la pérdida total

Sin embargo, la mejor relación con la extensión del daño es si el recubrimiento había sido aplicado o no.

6 fuegos sucedieron después de tener el recubrimiento. De ellos,

5 produjeron un daño local.

1 produjo la pérdida total. En éste el fuego empezó en la estructura de la cubierta.

8 fuegos sucedieron antes de tener el recubrimiento. De ellos,

2 produjeron un daño local

6 produjeron la pérdida total

El caso más típico de incendio fue en el que la actividad de la construcción inició el fuego en la paja suelta del suelo y se propagó a la paja suelta de la superficie de la pared. Independientemente del origen del fuego, en los 5 casos de fuego en una construcción con estructura de madera y balas de paja sin recubrimiento, la estructura se incendió y el colapso sucedió dentro de los primeros 25 minutos. En, por lo menos, 5 casos de fuego, éste se fue consumiendo poco a poco en los espacios entre las balas y era difícil extinguirlo con una manguera de agua. En un caso concreto de una construcción terminada y con el acabado superficial en el que el fuego se inició en la estructura de la cubierta, el proceso de combustión duró semanas hasta que la pared se deterioró lo suficiente, dando tiempo de sobra a desalojar la construcción.

Es importante cumplir unos requisitos para la construcción con balas de paja con el fin de evitar un posible incendio:

- 1- Asegurarse de que las personas que participen en el proceso son conscientes de la facilidad para arder que tiene la paja suelta.
- 2- La paja del suelo debe recogerse continuamente durante la elevación de las paredes y hasta que estas tenga el recubrimiento.
- 3- Tener mangueras de agua a presión cerca del lugar de trabajo o, preferiblemente, extintores de polvo seco.
- 4- Taponar las grietas entre balas, o entre las balas y la estructura, con una mezcla de paja y arcilla; además de recortar las protuberancias de las grietas puede reducir las posibilidades de que se inicie un fuego.
- 5- Aplicar la primera capa de recubrimiento lo antes posible. Las prácticas, no muy extendidas, de aplicar una capa de recubrimiento antes de colocar la bala en el muro o de sumergirlas en un baño de cal pueden reducir el riesgo de que se inicie un fuego.

Ensayo de resistencia al fuego realizado por Louis Gagné para la CMHC en Québec en 1986.

La muestra analizada en este caso estaba formada por 2 balas de paja recubiertas con un tipo de mortero del que se desconocen sus características. Este mortero, debido a su escasa resistencia térmica, permitía el intercambio de calor entre las balas de paja como indica la siguiente ilustración.



CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

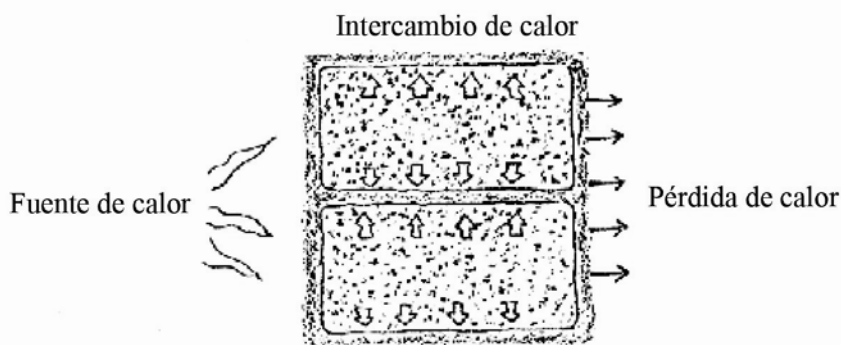


Fig. 11.1- Esquema de la muestra y del ensayo de resistencia al fuego [Louis Gagné – CMHC (1986)]

En la cara exterior de la muestra se colocaron, de forma repartida, tres sensores térmicos, uno en la junta y uno en cada bala. Estos sensores no presentaban grandes diferencias de transmisión térmica entre la zona media y los extremos. Esto es indicativo de una distribución uniforme del calor dentro de la pared. Después de los 240 minutos de ensayo y de haber alcanzado los 1102,8°C, la temperatura en la cara opuesta simplemente se elevó 39,5°C por encima de la tempera inicial, alcanzando los 63,6°C.

Los datos obtenidos por los sensores están representados en la tabla 11.1.

Tabla de resultados de temperaturas

Tiempo (min)	Temperatura	Temperatura cara opuesta (°C)			Promedio
		TC 1 (junta)	TC 2 (inferior)	TC 3 (superior)	
0	20,2	24,6	24,1	23,7	24,1
5	433,8	24,6	24,2	23,8	24,2
10	672,5	24,7	24,2	24,0	24,3
15	738,0	24,7	24,2	23,7	24,2
20	786,1	24,6	24,2	23,6	24,1
25	804,9	24,6	24,1	23,5	24,1
30	831,0	24,5	24,0	23,5	24,0
35	858,8	24,3	23,8	23,3	23,8
40	863,1	24,2	23,7	23,2	23,7
45	892,4	24,3	23,8	23,3	23,8
50	894,2	24,2	23,8	23,2	23,7
55	911,8	24,2	23,8	23,2	23,7
60	917,5	24,3	24,1	23,3	23,9
65	931,6	24,5	24,5	23,6	24,2
70	935,3	24,6	24,8	23,7	24,4
75	947,0	25,0	25,6	24,3	25,0
80	957,7	25,5	27,1	24,9	25,8
85	966,1	26,2	29,1	25,9	27,1
90	973,3	27,3	31,7	28,8	29,3
95	981,0	29,0	35,1	33,7	32,6
100	987,6	30,7	38,5	39,4	36,2
105	994,7	32,1	42,1	44,6	39,6
110	1000,5	33,7	45,6	49,2	42,8
115	1005,8	35,1	48,7	52,8	45,5
120	1010,0	36,5	51,6	55,8	48,0
130	1017,7	39,1	56,5	55,8	50,5
140	1025,7	41,5	60,1	62,2	54,6
150	1034,3	43,7	62,6	63,7	56,7
160	1042,7	45,7	64,3	64,5	58,2
170	1057,5	47,8	66,1	65,3	59,7
180	1056,7	49,9	66,8	65,3	60,7
190	1068,0	51,7	67,2	65,3	61,4
200	1075,1	53,3	67,5	65,2	62,0
210	1080,1	55,0	67,7	65,0	62,6
220	1086,3	56,6	67,7	64,7	63,0
230	1096,0	58,1	67,6	64,5	63,4
240	1102,8	59,2	67,5	64,0	63,6

Tabla 11.1



CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

Ensayo de resistencia al fuego ASTM E-119, realizado en 1993 en SHB Agra lab, Sandia (Nuevo México)

Se realizaron dos pruebas distintas de resistencia al fuego. La primera en una pared de balas de dos cuerdas sin recubrimiento y con un espesor total de 46 cm y la segunda en una pared de balas que tenía un recubrimiento de yeso en la cara calentada y de mortero de cal y cemento en la otra cara. De este ensayo existe un video comercializado por *Black Range Films* titulado “Building With Straw, Volume III – Straw Bale Code Testing”.

Los resultados del ensayo de resistencia al fuego fueron inesperados, ya que la pared sin recubrimiento resistió 34 minutos antes de parar el ensayo a causa de que las llamas atravesaron la pared por una junta entre balas. En este momento sólo se habían carbonizado 20 cm de los 46 totales. La máxima temperatura alcanzada en la cara caliente después de los 30 minutos fue de 922°C y en la otra cara la temperatura no se incrementó en más de 1°C.

La pared con recubrimiento fue ensayada durante 2 horas y soportó temperaturas que alcanzaron los 1.061°C. El recubrimiento de la cara caliente se agrietó y en estas zonas se carbonizaron unos 5 cm de material.

Según Manuel Fernández, Arquitecto y director del *Permitting and Plan Review for the State of New Mexico Construction Industries Division*, las paredes de balas de paja son superiores a las tradicionales de madera en relación a su resistencia al fuego¹. Con estos resultados queda claro que la resistencia al fuego es una de las ventajas de las paredes de balas de paja, más que un problema, como se podría pensar a priori.

Breve descripción del ensayo

La muestra de pared construida para realizar el ensayo estaba compuesta por 4 balas de paja colocadas en tres alturas: una en el fondo, una en la parte alta y dos en la fila intermedia, coincidiendo la junta vertical en el eje del conjunto. Esta configuración se usó para representar una muestra típica de estas paredes contrapeando las juntas.

Esta muestra se acopló a otras paredes existentes y se selló para evitar fugas por las juntas que se formaban. El ensayo comenzaba sometiendo una de las superficies de la pared a una llama, alcanzando en esta superficie una temperatura de 538°C en 5 minutos, 843°C a los 30 minutos y 954°C después de una hora.²

Resultados del ensayo

La transmisión de calor a través de las balas de paja sin recubrimiento durante este ensayo no fue suficiente como para elevar la temperatura en la cara exterior a 121°C (criterios establecidos en la ASTM E-

¹ Manuel A. Fernández. Summary Report on Straw Bale Construction Activity [on line]. Albuquerque, Nuevo México, febrero 1994. [Consulta: 22 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.dcat.net>>

² Bryce Simons. Report of Transverse Load Test and Small Scale E-119 Fire Test on Un-Coated Straw Bale Wall Panels and Stucco Coated Straw Bale Wall Panels [on line]. Albuquerque, Nuevo México, 1993. [Consulta: 22 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.dcat.net>>





CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

119). El valor medio de temperatura en esta cara fue de 11,5°C a los 30 minutos. Además, durante este período de 30 minutos, no se produjo la penetración de la llama a través de las balas de paja¹.

Se observó que la paja se quemaba lentamente y el material carbonizado tendía a permanecer en su posición. Éste hacía de protector del resto de la paja frente a la ventilación, por lo tanto, retrasando la combustión. Las balas no producían llamas, sino que se consumían muy lentamente. Ese fuego se extinguía fácilmente con un poco de agua.

El ensayo se prolongó más allá del período de los 30 minutos, hasta que se produjo la penetración de la llama en la junta vertical, que sucedió a los 34 minutos.

En el caso de la pared con recubrimiento, la máxima temperatura alcanzada en la cara exterior fue de 17,3°C. La máxima temperatura que se alcanzó en la cara caliente fue de 1061°C y no hubo penetración de llamas o gases a través de la pared².

Temperaturas en la cara exterior (°C) -muestra sin recubrimiento

Tiempo (min)	Fila inferior			Fila intermedia			Fila superior		
	TC 10 (izqda.)	TC 11 (medio)	TC 12 (dcha)	TC 13 (izqda.)	TC 14 (medio)	TC 15 (dcha)	TC 16 (izqda.)	TC 17 (medio)	TC 18 (dcha)
1	9,4	9,6	10,1	9,6	9,9	9,7	8,8	8,9	9,7
2	9,6	9,8	10,1	9,6	10,0	9,8	8,8	8,9	9,8
3	9,7	9,8	10,2	9,7	10,0	9,8	8,8	8,9	9,8
4	9,7	9,8	10,2	9,8	9,9	9,8	8,8	9,0	9,8
5	9,7	9,8	10,2	9,8	9,9	9,8	8,8	9,0	9,8
6	9,6	9,8	10,1	9,7	9,8	9,9	8,8	8,9	9,8
7	9,7	9,8	10,1	9,8	9,9	9,8	8,8	8,9	9,8
8	9,7	9,8	10,1	9,8	9,9	9,8	8,8	9,0	9,8
9	9,8	9,9	10,1	9,8	10,0	9,9	8,8	9,1	9,8
10	9,7	9,8	10,1	9,8	9,8	9,8	8,8	9,1	9,8
11	9,8	9,9	10,1	9,8	10,0	9,8	8,8	9,0	9,8
12	9,8	9,8	10,1	9,8	9,9	9,8	8,8	9,1	9,8
13	9,6	9,9	10,1	9,9	9,9	9,9	9,2	9,0	9,8
14	9,8	9,9	10,1	9,9	10,1	9,8	8,8	9,1	9,9
15	9,8	10,0	10,2	9,8	10,1	9,8	8,9	9,1	9,9
16	9,8	9,9	10,2	9,9	10,1	9,9	8,9	9,1	9,9
17	9,8	9,9	10,2	9,9	10,1	9,8	8,8	9,1	10,0
18	9,8	9,9	10,2	9,9	10,1	9,9	8,9	9,1	10,0
19	9,8	9,9	10,3	9,9	10,1	9,9	8,9	9,1	10,1
20	9,8	10,0	10,3	9,9	10,2	10,0	9,0	9,1	10,1
21	9,8	10,0	10,3	9,9	10,2	10,0	9,1	9,2	10,2
22	9,9	10,1	10,4	9,9	10,3	10,0	9,2	9,2	10,2
23	9,9	10,1	10,4	9,9	10,3	10,1	9,3	9,3	10,3
24	9,9	10,1	10,4	9,9	10,4	10,2	9,3	9,3	10,4
25	9,9	10,1	10,5	10,0	10,5	10,2	9,3	9,6	10,5
26	10,1	10,2	10,6	10,0	10,6	10,2	9,4	9,7	10,6
27	10,1	10,2	10,6	10,1	10,7	10,3	9,5	10,1	10,8
28	10,1	10,2	10,7	10,0	10,8	10,3	9,6	10,4	10,9
29	10,1	10,2	10,8	10,1	11,1	10,4	9,7	10,8	11,2
30	10,2	10,2	10,8	10,1	11,4	10,4	9,8	11,2	11,0

Tabla 11.2- Resultados de los sensores térmicos de la cara exterior de las muestras [Report of Transverse Load Test and Small Scale E-119 Fire Test on Un-Coated Straw Bale Wall Panels and Stucco Coated Straw Bale Wall Panels – Bryce Simons – SHB AGRA, INC. (1993)]

¹ Bryce Simons, op. cit.

² Bryce Simons, op. cit.





CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

Temperaturas en la cara exterior (°C) -muestra con recubrimiento

Tiempo (min)	Temperatura	Fila inferior			Fila intermedia			Fila superior		
		TC 10 (izqda.)	TC 11 (medio)	TC 12 (dcha)	TC 13 (izqda.)	TC 14 (medio)	TC 15 (dcha)	TC 16 (izqda.)	TC 17 (medio)	TC 18 (dcha)
0	6,1	5,7	5,6	5,3	5,9	5,7	5,2	5,3	5,7	8,2
5	575,6	9,5	9,5	9,4	8,4	7,8	7,8	7,9	8,2	8,2
10	717,4	9,4	9,6	9,3	8,3	8,8	7,7	7,9	8,1	8,1
15	715,0	9,4	9,5	9,3	8,3	8,8	7,7	7,8	8,1	8,1
20	724,8	9,4	9,6	9,4	8,3	8,8	7,7	7,8	8,1	8,1
25	748,9	9,4	9,3	9,6	8,4	8,7	7,7	7,8	8,1	8,0
30	764,9	9,4	9,5	9,6	8,4	8,7	7,7	7,9	8,2	8,0
35	742,3	9,3	9,6	9,5	8,3	8,7	7,7	7,8	8,1	8,0
40	815,9	9,4	9,6	9,5	8,3	8,7	7,7	7,8	8,1	7,9
45	883,4	9,9	9,6	9,4	8,3	8,5	7,6	7,8	8,1	7,9
50	904,4	9,4	9,7	9,4	8,3	8,6	7,7	7,9	8,1	8,1
55	944,6	9,4	9,8	9,4	8,3	8,6	7,7	7,9	8,1	8,1
60	979,6	9,5	9,9	9,4	8,4	8,7	7,7	8,1	8,2	8,2
65	995,3	9,3	9,9	9,3	8,3	8,6	7,8	8,2	8,1	8,2
70	1003,8	9,4	9,9	9,3	8,4	8,7	7,8	8,2	8,2	8,3
75	1011,6	9,5	10,1	9,2	8,4	8,8	7,8	8,3	8,2	8,3
80	1018,8	9,7	10,4	9,4	8,4	8,9	7,9	8,3	8,3	8,5
85	1030,3	9,6	10,2	9,4	8,5	9,1	8,1	8,5	8,4	8,6
90	1034,5	9,6	10,2	9,5	8,6	9,1	8,1	8,6	8,5	8,7
95	1035,8	9,7	10,2	9,6	8,7	9,4	8,3	8,7	8,8	8,8
100	1040,7	9,7	10,2	9,6	8,7	9,9	8,3	8,8	9,3	8,8
105	1047,1	9,8	10,3	9,8	8,8	10,9	8,4	8,9	10,3	9,1
110	1052,5	9,9	10,4	9,7	8,8	12,4	8,6	8,9	11,4	9,2
115	1054,7	9,9	10,4	9,8	8,9	14,6	8,7	9,1	13,1	9,3
120	1061,1	10,0	10,4	9,8	9,1	17,3	8,8	9,3	14,8	9,4

Tabla 11.3- Resultados de los sensores térmicos de la cara exterior de las muestras - Report of Transverse Load Test and Small Scale E-119 Fire Test on Un-Coated Straw Bale Wall Panels and Stucco Coated Straw Bale Wall Panels – Bryce Simons –

Ensayo de resistencia al fuego según ASTM E119, Texas (2006)¹

Se construyeron dos paredes distintas de balas de paja dentro de unas estructuras de acero que se pudiesen desplazar.

Muestra 1:

Se construyó con balas de paja de dos cuerdas colocadas en sentido horizontal, con un ancho de 406 mm, y se le aplicó en coronación, antes de aplicarle el recubrimiento, una carga uniformemente repartida de 8,76 kN/m. El recubrimiento era de barro con paja picada y se aplicó en dos capas hasta alcanzar un espesor total en cada lado de 25 mm.

Muestra 2:

Las balas se colocaron en sentido vertical, con un ancho de 356 mm, dejando las ataduras plásticas justo bajo la superficie del recubrimiento. Éste fue de cal y cemento, aplicado en dos capas hasta alcanzar un espesor total de 25 mm, y con un refuerzo a base de una malla metálica.

Una vez terminada la muestra, el conjunto (pared junto con la estructura metálica) se desplazaba hasta la parte frontal del quemador. Después de 1 hora de ensayo, la temperatura había alcanzado los 927°C y se mantenía ahí o se elevaba según el ensayo del que se tratara. Una vez terminado el ensayo, la muestra completa se trasladó a una posición en la que una manguera de incendios rociaba con agua la cara calentada además de aplicar presión para comprobar la estabilidad de la muestra.

¹ CONFER – Bruce King con Bob Theis. Design of straw bale buildings, op. cit.





Fig. 11.2- Retirada de la muestra 2 de la cámara de fuego [Bruce King con Bob Theis, op. cit.]



Fig. 11.3- Aspecto de la muestra número 2 tras 2 horas de exposición directa al fuego [Bruce King con Bob Theis, op. cit.]

CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO



Fig. 11.4- Enfriamiento de la pared con manguera con agua a elevada presión [Bruce King con Bob Theis, op. cit.]

Comentarios

Muestra 1:

Las grietas comenzaron a aparecer en la cara caliente a los 25 minutos del inicio del ensayo. Esas grietas permitían la penetración de aire, lo cual facilitaba la penetración del fuego. Según iba avanzando el ensayo, las grietas iban aumentando de tamaño, incluso llegando a desprenderse alguna zona. Se pudo observar que las zonas más delicadas a la acción del fuego eran las juntas, penetrando con mayor facilidad el fuego. Esto viene a demostrar que es más efectivo rellenar estas juntas entre balas con paja mezclada con algún tipo de mortero que simplemente con paja suelta.

Después de una hora de ensayo, el fuego no había alcanzado la cara opuesta de la pared, por lo que se le reconoció una resistencia al fuego de **60 minutos**. Además, el espesor de material quemado en la cara expuesta no superaba los 10 cm.

Muestra 2:

El muro empezó a desarrollar grietas en la cara caliente a los 20 minutos del principio del ensayo, antes que la muestra 1. Según avanzaba el ensayo, las grietas iban aumentando en número y en tamaño, permitiendo la entrada de oxígeno y del fuego. Al final de las 2 horas, la cara exterior no presentaba grietas y la calificación para esta configuración de pared fue de resistente al fuego durante **120 minutos**. Como se esperaba, las ataduras plásticas se habían derretido pero a pesar de esto, las balas permanecían intactas en su posición.



CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

Resumen de resistencias al fuego en distintos ensayos

- Año 1986:

Balas colocadas en posición horizontal

Mortero de recubrimiento de composición desconocida

Resistencia de **240 minutos**. Incremento de temperatura en la cara opuesta de 39,5°C

- Año 1993. Muestra 1:

Balas colocadas en horizontal

Ausencia de mortero de recubrimiento

Tras **34 minutos** las llamas alcanzan la cara opuesta

- Año 1993. Muestra 2:

Se desconoce la orientación de las balas de paja

Recubrimiento de yeso por la cara calentada y de cal y cemento en la opuesta

Tras **120 minutos** las llamas no alcanzan la cara opuesta

- Año 2006. Muestra 1:

Balas de 2 cuerdas colocadas en horizontal

Recubrimiento de barro y paja con un espesor de 25 mm.

Resistencia al fuego de **60 minutos**

- Año 2006. Muestra 2:

Balas de dos cuerdas colocadas en vertical

Recubrimiento con mortero de cal y cemento con malla metálica (25 mm. de espesor)

Resistencia al fuego de **120 minutos**

11.3 Conclusiones del análisis técnico

Intentar quemar una bala de paja es similar a hacerlo con un listín telefónico. La paja seca suelta arde con mucha facilidad pero al estar embalada, en su interior apenas hay oxígeno y la combustión se limita a las pajas sueltas de la superficie¹. De todos modos, es importante que a la hora de aplicar el recubrimiento de la paja, éste se aplique de forma que no quede ninguna fibra de paja sin cubrir. Esta precaución es necesaria para que en caso de que se produzca un fuego, éste no entre en contacto directo con la paja.

No parece lógico pensar que una pared de balas de paja pueda ser segura frente al fuego, siendo la paja un material que arde tan fácilmente. Sin embargo, el fuego necesita una elevada temperatura, combustible y oxígeno. Al comprimir la paja para formar la bala, la cantidad de oxígeno en ésta para alimentar el fuego se reduce.

¹ Patricia Cebada y Rubén Solsona. Casas sanas y ecológicas con balas de paja. 1ª edición, noviembre 2005. 92 p. Disponible en web: <<http://www.tallerkaruna.org>>





CAPÍTULO 11 – RESISTENCIA AL FUEGO

La capacidad de las paredes de balas de paja, con o sin recubrimiento, para resistir el fuego está confirmada por una serie de ensayos e informes realizados hasta la fecha. Tanto la experiencia de laboratorio como la de campo clasifican estas paredes como muy resistentes a la destrucción por las llamas, a la propagación de la llama y a la combustión.

Las posibilidades de que se incendien las balas una vez que la construcción está terminada son mínimas, pero es en la fase de construcción cuando existe un gran peligro. En este momento las balas están desprotegidas y por el suelo habrá paja tirada. Es importante mantener la zona de trabajo limpia para que en caso de incendio, éste se propague con dificultad y se pueda apagar con facilidad. La fase de construcción es muy peligrosa en este sentido porque, aunque las balas de paja arden con dificultad, el fuego se puede originar en cualquier rincón en el que existan unas fibras de paja suelta.



*C*apítulo 12

PROCESO CONSTRUCTIVO

**12.1 Inicio del proceso constructivo****12.1.1 Introducción**

A lo largo de las páginas se ha podido comprobar que lo que estamos a tratar es un tipo de construcción poco común. No está muy extendido su uso, no existe una normativa específica en nuestro país, al igual que en muchos otros, y además suelen ser construcciones materializadas por sus propios dueños. Por estas y otras razones, los apartados que se avocinan serán enfocados de forma que se aprecie fácilmente todo el proceso que se puede realizar para materializar una construcción de este tipo. El número de personas que se ponen a ello va en aumento, ya sea por curiosidad y ganas de practicar un tipo de construcción innovadora o por conciencia ecológica. El autor de este documento tenía previsto participar en los meses de Julio y Agosto en la construcción de un pequeño cobertizo de balas de paja, cosa que habría sido muy interesante. Lamentablemente el proyecto sufrió retrasos y fue necesario posponer su ejecución hasta el verano del año 2007.

Los procesos que a continuación se detallan están centrados fundamentalmente en criterios constructivos y no pretenden ser justificables desde el punto de vista de las diversas normativas existentes en el campo de la construcción. Éste sería un tema íntimamente relacionado con el que se está tratando pero que necesitaría un enfoque muy distinto al que pretende tener este trabajo.

12.1.2 Elección del emplazamiento

Éste es un paso importante ya que será definitivo porque es algo que no se va a poder modificar una vez se comience la construcción. Entre otras cosas debe ser una zona relativamente plana ya que evitará tener que hacer movimientos de tierra. Si fuese excesivamente plano existe la posibilidad de que el agua se acumule en las zonas próximas con los problemas que esto puede ocasionar. También es muy importante una buena orientación solar para aprovechar esta energía. Para esto hay que tener en cuenta edificaciones, árboles o cualquier otro obstáculo que impida el correcto soleamiento¹.

12.1.3 Elección de las balas de paja

Lo primero que hay que decidir es el tamaño de los fardos. Existen muchos formatos de embalado de la paja aunque los más recomendados para la construcción de los muros son los de 2 y los de 3 cuerdas con forma de prisma rectangular. Aparte de éstos también están los de 6 o 7 cuerdas e incluso los de forma cilíndrica. Estos últimos no se utilizan en la construcción de muros por su forma y por sus dimensiones. En los de 2 y 3 cuerdas la diferencia fundamental está en el ancho, es decir, lo que sería el tizón en un ladrillo o lo que es lo mismo, la longitud de las fibras. El tamaño de los de 3 cuerdas puede estar en torno a los 58x41x107 cm. mientras que el de los de 2 cuerdas ronda los 46x36x91 cm.

¹ CONFER – S. O. MacDonald. Versión en Español de: Una introducción visual a la construcción con fardos de paja, 1999. 22p.



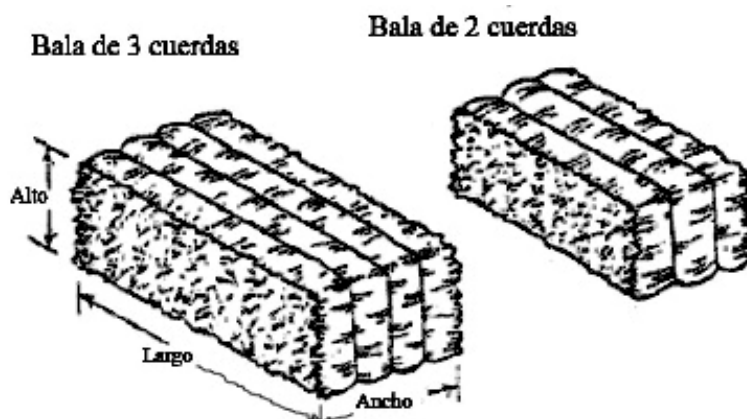


Fig. 12.1- Ejemplos de balas de paja [S.O. MacDonald, op. cit.]

Como se ve en los dibujos, los fardos tienen tres medidas diferentes: alto, ancho y largo. Cuando la parte más ancha, o anchura, se pone paralela al suelo, se dice que está situado **“en horizontal”**. Cuando el más estrecho de los dos lados está puesto paralelo al suelo, se dice que está apoyado **“en vertical”**.

Tan importante como la fabricación de los fardos es la manera de recoger la paja y la cosecha. Se debe cortar cuando está bien seca y no permitir que se moje o se humedezca en el campo.

Los fardos vienen atados con alambre de embalar o con ataduras de polipropileno (cuerdas). Se han construido estructuras con los dos tipos y parece que no hay diferencias estructurales entre ellos, excepto que el de cuerdas es más fácil de modificar, sólo requiere de un cuchillo o unas tijeras para cortar las cuerdas¹.

Es importante saber que para construir no sirve cualquier tipo de fardo, sobre todo si es para hacer muros de carga. Es un aspecto de suma importancia porque de él va a depender, entre otras cosas, el funcionamiento estructural de la construcción.

Para empezar, el fardo que se coloque en obra debe estar seco. En principio es fácil que los fardos estén secos por el exterior ya que es lo que primero se seca pero es recomendable meter los dedos por entre las fibras para comprobar si a unos centímetros de la superficie hay humedad. Sólo se deberían utilizar fardos cuyo contenido de humedad fuese inferior al 25% para evitar un problema de putrefacción que tuviese origen en el material antes de su colocación. De todos modos siempre es mejor tener un 15% ya que estamos mucho más del lado de la seguridad. Además, si el contenido de humedad es elevado, cuando pesemos y midamos la bala de paja para determinar la densidad, resultará que la densidad aparente es mucho mayor que la real, resultando un valor engañoso. Se está inventando un instrumento para medir la compresibilidad real de los fardos en el campo. Una vez que haya sido desarrollado, probado y hecho asequible debería eliminar la necesidad de realizar pruebas de humedad excepto para determinar si los fardos están suficientemente secos como para ser recubiertos².

Los tallos deben ser fuertes y flexibles. Se deben doblar y estirar para chequear la fuerza que soportan y su carácter quebradizo. La paja cosechada y mantenida seca, madura y brillantemente coloreada, hace los mejores fardos.

¹ CONFER - Athena Swentzell et al. Traducción al Español de: The Straw Bale House: Designing and Building With a Resource-Efficient Material. Chelsea Green Publishing Company, 1994. 300 p. ISBN 0930031717

² CONFER - Athena Swentzell et al., op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

La densidad de la bala es uno de los factores de mayor importancia de cara al comportamiento estructural de una pared de balas de paja. Cuanta mayor densidad tengan los fardos, menos energía será necesario aplicar al muro en su conjunto para conseguir una precompresión antes de someterlo a la carga que deba soportar. De otro modo habrá que aplicar mayor cantidad de energía para alcanzar un punto en el que el muro soporte sin mucho asiento la carga superior. Por otro lado, cuanto mayor cantidad de energía se aplique al muro, mayor es el descenso que este sufre en su coronación. Una densidad buena estaría en torno a 110 kg/m³. Se puede comprobar el grado de compactación del fardo cogiéndolo en peso por las cuerdas que lo rodean. Un buen fardo debe presentar dificultad para meter la mano por debajo de sus cuerdas, como se ve en el siguiente dibujo, y que no se deforme al levantarlo.

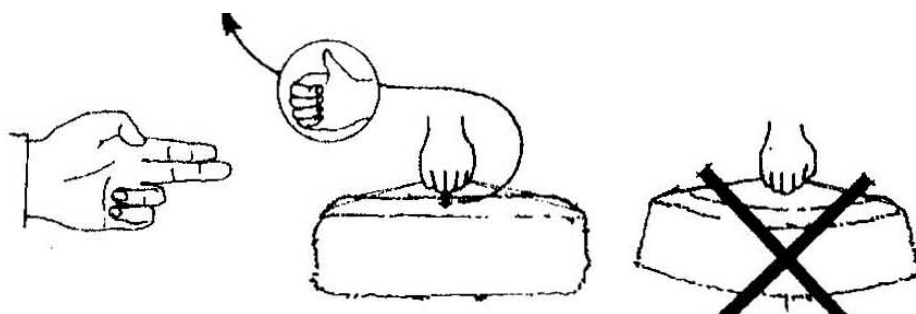


Fig. 12.2- [S.O. MacDonald, op. cit.]

Aunque la excesiva compresión reduce el aislamiento, poca tensión hace que los fardos sean tambaleantes y muy blandos. Una embaladora mecánica puede regular la compresión de los fardos girando en un sentido o en otro unas palancas que tiene en la parte posterior. Al comprar fardos es difícil conseguir la compresión requerida a no ser que se negocie con la persona encargada de hacer los fardos.

También se debe prestar atención en comprobar que los fardos tienen todos un tamaño lo más uniforme posible. De este modo será más fácil el aparejo de los fardos y facilitará el trabajo de la conformación de piezas de fardo para remates.

Una norma fundamental en la construcción con fardos de paja es mantener los fardos secos mientras se construye. Durante el transporte se deben proteger de la humedad y una vez que llegan al lugar de trabajo se deben colocar en una zona protegida de la lluvia. Tienen que ser almacenados a cierta altura del suelo para que no absorban la humedad de éste, y cubiertos con lonas de buena calidad para protegerlos de la lluvia. Los plásticos y lonas baratas se pueden romper o agujerear y esto haría que penetrara la humedad. Un buen método de protección es cubrir el montón de balas con un plástico y posteriormente con una lona. Es conveniente poner algo pesado, como ladrillos o bloques de cemento, en las puntas de las cuerdas que atan las lonas que cubren el montón de fardos, ya que el fuerte viento puede levantar dicha lona¹.

La lona también sirve para cubrir la pared durante la construcción, aunque no se espere lluvia, para así mantener secos los fardos.

Los fardos húmedos deben de almacenarse en filas más que en montones compactos para acelerar el secado y prevenir posibles problemas de putrefacción.

¹ CONFER – S. O. MacDonald, op. cit.

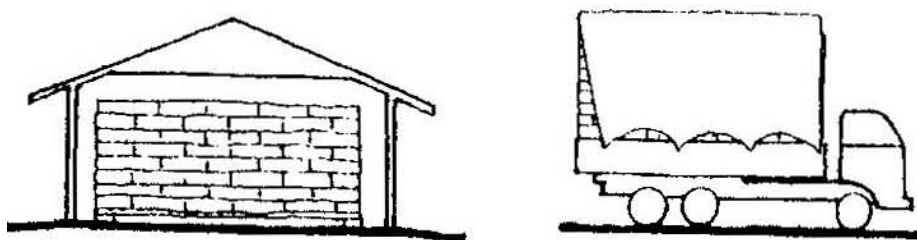


Fig. 12.3- [S.O. MacDonald, op. cit.]

Lo mejor es conseguir los fardos muy pronto en el proceso de diseño de la casa, para que las medidas encajen perfectamente. Es un contratiempo haber diseñado un edificio para fardos de 105 cm de largo y sólo encontrarlos de 115 cm. También es prudente verificar la disponibilidad de los fardos antes de comenzar la construcción.

Para determinar el tamaño medio de los fardos se tumban 10 de ellos al azar y se alinean mientras se mide la longitud total. El resultado se divide entre 10 para tener la longitud media. Este mismo proceso se hace con la altura. Es mucho más fácil rellenar huecos o rendijas que hacer cantidad de fardos por encargo. Hacer fardos de diferentes tamaños para diferentes aplicaciones puede ser muy útil, sobre todo los fardos pequeños, que se pueden utilizar para el interior al dar mayor flexibilidad al diseño de paredes¹.

12.1.4 Manipulación de las balas de paja

Los fardos de paja son fáciles de mover y de amontonar. Dos personas trabajando juntas reducen el esfuerzo y aceleran el trabajo. Los fardos de paja suelen ser abrasivos, así que, son altamente recomendables las camisetas de manga larga y los pantalones largos además de máscaras para el polvo, que suele ser intenso. Los guantes son también muy útiles. El secreto para levantar y mover los fardos es usar el peso del cuerpo en el momento más que utilizar la fuerza muscular. Una carretilla es muy útil para mover los fardos no muy lejos y un pequeño tractor con una pala frontal suele agilizar mucho el trabajo.

12.1.5 Modificación de las balas de paja

Los fardos grandes pueden ser modificados a cualquier otro tamaño, pero antes de cortar los nudos, y para que el fardo no se deshaga, tiene que ser apretado y anudado otra vez. Para modificar los fardos se necesita un nuevo trozo de cuerda con el que se atarán los dos trozos de fardo que resultarán de la operación. Para esta tarea se puede fabricar una aguja de un trozo de varilla de acero de un diámetro de unos 8 mm y unos 100 cm de largo. Una de las puntas de la varilla será aplanada y afinada en punta con dos agujeros para pasar las cuerdas. La otra punta puede ser doblada en un ángulo de 90 grados sexagesimales para tener una zona que poder agarrar para ejercer fuerza².

¹ CONFER – S. O. MacDonald, op. cit.

² CONFER - Athena Swentzell et al., op. cit.

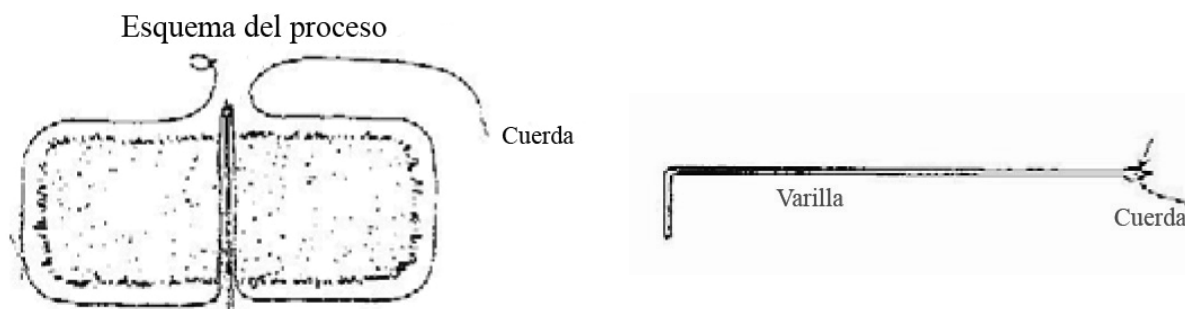


Fig. 12.4- Herramienta y proceso para la modificación de las balas de paja [Athena Swentzell et al., op. cit.]

Uno de los métodos más simples para modificar los fardos de paja fue desarrollado por John Ruez, que construye muchos edificios de paja en el sur de Arizona. Básicamente consiste en pasar la cuerda por la perforación de la varilla dejando suficiente trozo para cada lado, perforar el fardo por la zona en que se quiere realizar la división, realizar el nuevo atado y cortar el anterior. Es importante que el nuevo atado se realice de forma enérgica antes de recortar la cuerda existente para que no se vea alterada la densidad del material¹.

Los fardos pueden cortarse también con una sierra, tanto mecánica como manual además de con un cuchillo de cocina muy afilado. También se pueden modificar para formar ángulo o cuña para las puertas y ventanas.

A menudo, los fardos se tuercen o inclinan al colgarlos y deben ser enderezados. Poniendo otro fardo o alguna cosa para apoyar una parte del fardo, una presión de la mano o de la rodilla suele ser suficiente para enderezar el fardo. La misma sencilla técnica puede utilizarse para curvar los fardos para estructuras redondas.

En ocasiones es necesario hacer formas como las que aparecen a continuación.

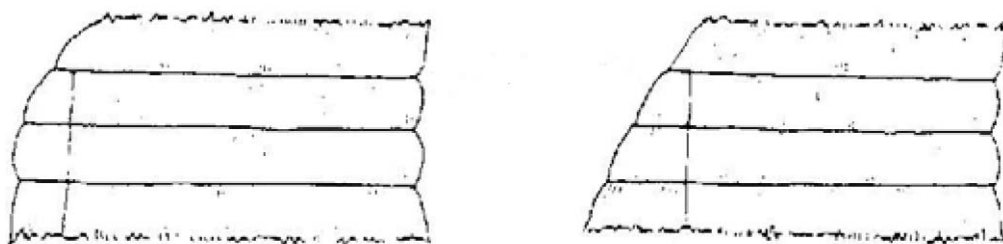


Fig. 12.5- Ejemplos de formas de las balas [Athena Swentzell et al., op. cit.]

En el caso de la figura de la izquierda sería suficiente con realizar un tensado de la cuerda superior. En el caso de la figura de la derecha es necesario proceder de igual forma que si fuera como para dividir el fardo en dos mitades. Después de realizar el atado se recorta el fardo siguiendo la alineación de las perforaciones.

¹ CONFER - Athena Swentzell et al., op. cit.



12.2 Cimentaciones

12.2.1 Introducción

Todas las construcciones necesitan tener algún tipo de cimentación sobre la que construir. Ésta puede ser simplemente el cimientado natural de la tierra sobre el que se extienda simplemente una capa de grava compactada pero en la actualidad estamos más acostumbrados al hormigón pobre y a las zapatas y vigas de cimentación. La cimentación tiene que transmitir el peso de las paredes que tiene encima y otras cargas como pueden ser estructuras horizontales, tejados e incluso la nieve. Por esta razón es importante saber qué tipo de subsuelo existe en la zona elegida para la construcción¹. Distintos tipos de suelo soportan distintos tipos de carga. La piedra por ejemplo, en condiciones normales, soporta más carga que un suelo arcilloso. Por otro lado, si se aumenta el área de reparto de carga en este tipo de suelo se pueden alcanzar niveles como para soportar cargas elevadas. Para una pequeña construcción hecha con materiales ligeros no hay necesidad de construir una gran cimentación de hormigón. De igual forma, en el caso de construcciones pesadas construidas en terreno duro, tampoco hay necesidad de tales cimentaciones. Si comparamos el peso de un metro cuadrado de cerramiento de paja (75 kg) con el de un cerramiento de ladrillo (212 kg) vemos que lo que estamos manejando es un tipo de pared que no tiene mucho peso propio².

Casi todas las construcciones que tienen más de 100 años están hechas sin éstas. Se apoyan en el propio muro que tiene un poco más de ancho en esta zona. En todos los casos se retiró la capa superior del terreno y se cavó hasta encontrar algo sólido. Como solían escoger bien los sitios, la profundidad de excavación era más bien reducida³.

Como se puede ver, la cimentación que tienen que tener estos muros no tiene que ser demasiado grande, ni siquiera de hormigón. Esto no significa que se desaconseje, más bien todo lo contrario ya que con hormigón podemos diseñar bases que nos den soluciones para un correcto funcionamiento del sistema.

12.2.2 Tipos de cimentaciones

Habiendo entendido el apartado anterior acerca de una cimentación sólida y estable sobre la que colocar una construcción, es necesario prestar atención a los requisitos del material de construcción de las paredes llamado paja.

La base de una pared de balas de paja necesita mantenerse seca. Esto significa que debe estar elevada del suelo lo suficiente como para que no salpique la lluvia y debe tener un sistema que permita que se pueda evacuar la posible humedad que pueda acumular en la fila inferior.

Diferencias de la cimentación a causa del empleo de paja

- Sistema de fijación de la coronación del muro a la base del mismo.

¹ CONFER – Barbara Johnes. Information Guide to Straw Bale Building [on line]. Amazon Nails, 2001. [Consulta: 27 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalefutures.org.uk>>

² CONFER – Barbara Johnes, op. cit.

³ CONFER – Barbara Johnes, op. cit.



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

El diseño de cimentación debe incorporar algún sistema que permita a la coronación del muro ser fijada a la base para que la primera no tenga grandes desplazamientos. Esto se puede conseguir de varias formas que veremos más adelante.

- Fijación del marco de las puertas.

Cualquier elemento que tenga que ir fijado directamente a la base del muro se debe haber previsto desde un principio.

12.2.2.1 Murete de piedra con suelo de entramado de madera

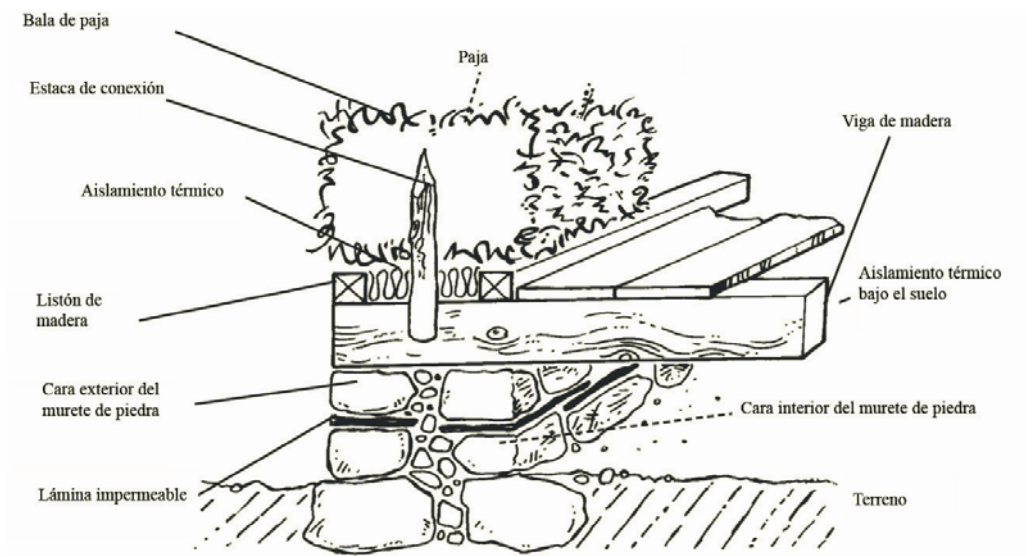


Fig. 12.6- [Barbara Johes, op. cit.]

La parte más inferior de la pared de balas de paja debe estar algo elevada del suelo para proteger la paja de las salpicaduras. Además de esto, es aconsejable realizar un drenaje perimetral para mantener la zona lo más seca posible¹.

Ventajas

Las ventajas fundamentales que tiene son que está hecho prácticamente con materiales naturales e incluso la piedra puede haber sido aprovechada de otros usos. Es muy fácil su ejecución, incluso sin conocimientos previos sobre construcción, y puede ser utilizado prácticamente todo si se decide desmontar por la razón que sea².



Fig. 12.7- Construcción de cimentación de piedras [Patricia Cebada y Rubén Solsona. Casas sanas y ecológicas con balas de paja]

¹ CONFER – Barbara Johnes, op. cit.

² CONFER – Barbara Johnes, op. cit.

Inconvenientes

Uno de los principales es que el coste de la ejecución de un murete de este estilo es superior que si se tratara de bloques prefabricados de hormigón. Esto es consecuencia de es un método bastante lento en su ejecución. Además, según la piedra que utilicemos, puede llegar a ser mucho más cara que los bloques de hormigón¹.

Otra posible forma de hacer una cimentación de piedra sería como la anterior pero variando la configuración de la parte que queda oculta en el terreno.

En el fondo de la zanja se vierte una capa de hormigón de unos 10 cm. en la que se colocan unas barras de refuerzo de acero. Sobre esta capa se colocan piedras y se añade más hormigón y piedras hasta alcanzar el nivel del suelo. A partir de aquí la configuración podría ser igual que en el caso anterior. También se podría colocar la capa de aislamiento térmico en este murete cerca de la cara exterior (en este caso funcionaría claramente mejor en la cara externa que en la interna). Colocándolo de esta forma, la cara externa del muro serían piedras de poco espesor para tapar el aislante térmico².

12.2.2.2 Cimentación de bloques sobre grava

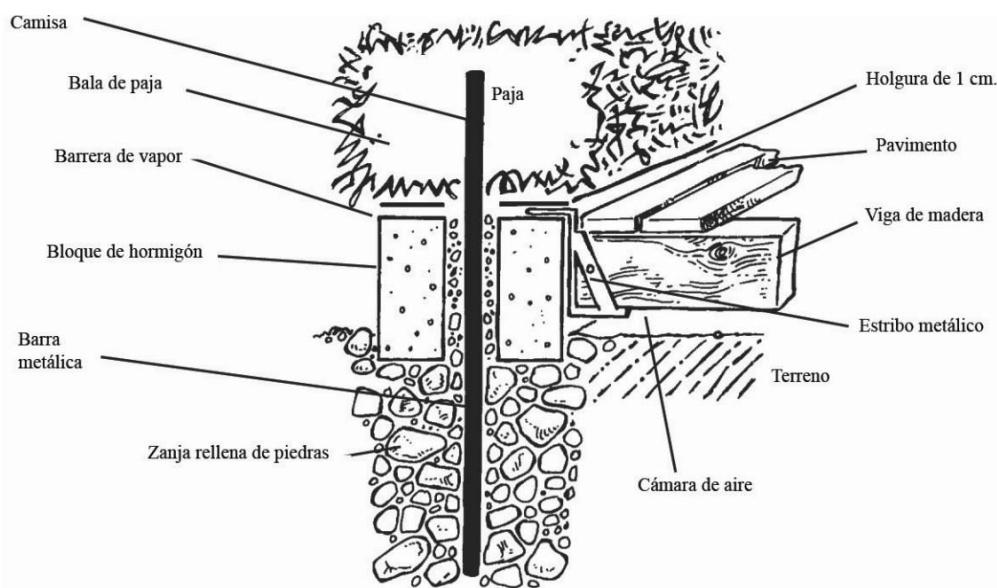


Fig. 12.8- [Barbara Johes, op. cit.]

Este es a menudo una buena elección para una construcción económica y fácil de ejecutar.

¹ CONFER – Barbara Johnes, op. cit.

² CONFER - Athena Swentzell et al. Traducción al Español de: The Straw Bale House: Designing and Building With a Resource-Efficient Material. Chelsea Green Publishing Company, 1994. 300 p. ISBN 0930031717

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Ventajas

Es de rápida ejecución y fácil de realizar incluso sin experiencia previa. Además, es relativamente barato y se pueden utilizar bloques ya usados anteriormente.

Inconvenientes

Es un sistema que no es muy bonito pero el principal problema es que la primera fila de balas tiene muchas posibilidades de tener problemas de putrefacción. A pesar de tener la lámina impermeabilizante en el medio, está en contacto con los bloques que absorben y acumulan la humedad del suelo.

Proceso constructivo



Fig. 12.9- Proceso de preparación de la base [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]



Fig. 12.10- Colocación de la lámina impermeabilizante [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]



Fig. 12.11- Fijación de la primera fila de balas [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

- Cimientos tipo muelle

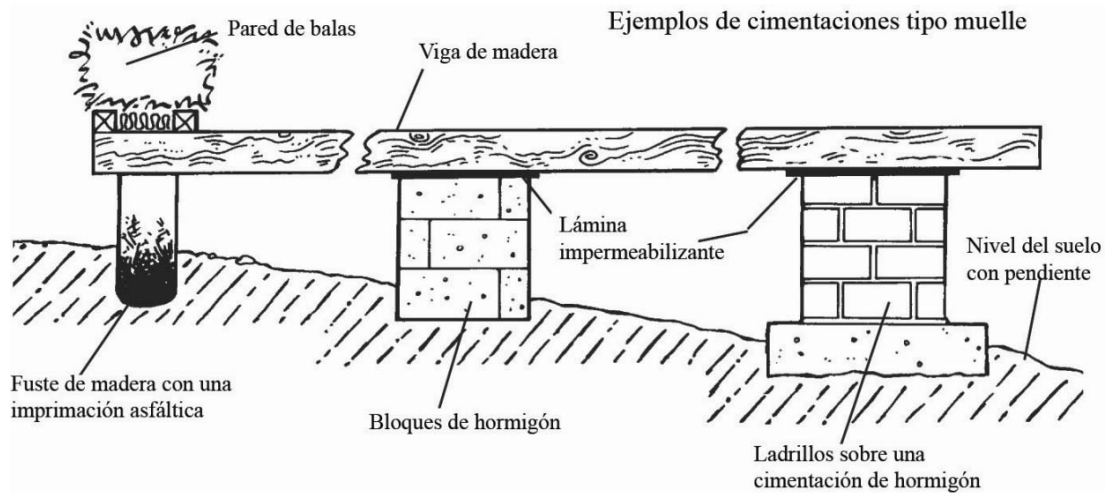


Fig. 12.12- [Barbara Johes, op. cit.]

Este es un excelente ejemplo de cimentaciones de bajo impacto y especialmente útil cuando se construye en un lugar con pendiente. Puede ser utilizado fácilmente con diferentes alturas de terreno simplemente incrementando la altura del soporte. Además, tiene bajo coste y es mucho más económico que hacer las cimentaciones corridas bajo los muros de la construcción. Por otro lado, tiene un bajo impacto en el medioambiente. Una serie de agujeros es menos agresiva que una zanja que se extienda bajo toda la pared exterior. De esta forma se crea un espacio bajo el suelo que puede ser utilizado de alguna forma. Al igual que sucedía en los casos anteriores, es relativamente fácil de construir ya que no se necesitan conocimientos especiales y dependiendo de los materiales utilizados, éstos pueden llegar a ser reciclados.

Como desventaja simplemente mencionar que puede llegar a ser un factor limitativo del diseño que se quiera hacer de la construcción.

12.2.2.3 Hormigón vertido

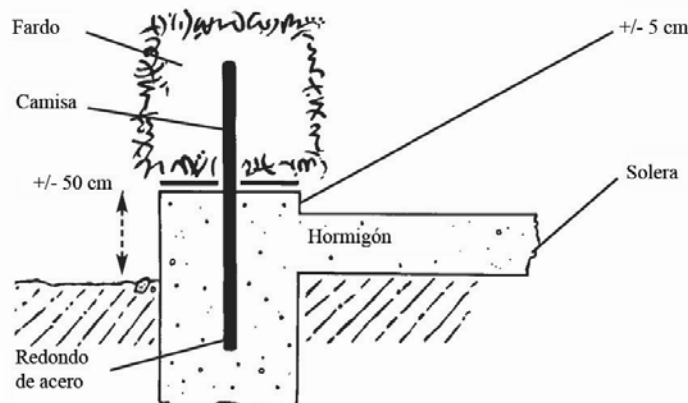


Fig. 12.13- [Barbara Johes, op. cit.]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Este es un método que se hizo popular en el siglo XX y todavía lo es por muchas razones. En el dibujo anterior no está correctamente representada la solución constructiva de la solera para evitar el ascenso de agua por capilaridad. Una buena solución podría ser la típica de una capa de grava, encima un lecho de arena, sobre esta una barrera de vapor y una capa de material aislante térmico.

Ventajas

Es un sistema muy familiar para muchas personas y sobre todo para profesionales. De cara a poder ser aceptado por las normativas o leyes posiblemente lo tenga más fácil que con otro sistema de cimentación. Es rápido y sencillo de ejecutar si se emplean los medios adecuados; una vez que está hecha la preparación se puede verter el hormigón rápidamente, lo que significa que se dispone rápidamente de una superficie cómoda de trabajo.

Inconvenientes

Igual que en el caso de los bloques sobre la grava, la fila inferior de balas de paja tiene problemas de humedades. Aunque se utilice una barrera de vapor entre el bloque de hormigón y la primera fila de balas para evitar el ascenso de agua por capilaridad, ésta es una zona fría en la que se pueden producir condensaciones. Además, la humedad que puedan tener las balas quedará retenida en esta zona.

Tal vez no nos demos cuenta porque para nosotros es algo muy habitual pero la realidad es que para producir el hormigón se necesita un gasto elevado de energía aparte de la contaminación que se genera.

Si este trabajo lo va a hacer uno mismo puede resultar demasiado duro porque el manejo del hormigón es una tarea que requiere varias personas e incluso maquinaria. Es decir, puede resultar no muy divertida la construcción de la cimentación o por lo menos no tanto como de otra forma.

12.2.2.4 Cimentación de zanja de escombros

Al igual que en el caso anterior, no está correctamente representada la solución constructiva de la solera, que podría ser como se ha descrito anteriormente. Además, sería recomendable colocar una plancha de aislante térmico entre la lámina impermeable que está bajo la primera fila de balas y la viga de hormigón. Aparte de disminuir las posibilidades de condensación en esta zona disminuiría las pérdidas caloríficas por la parte baja de la pared, que es un punto muy propenso a esta situación.

Este tipo de cimentación consiste en una zanja llena de piedra comprimida y rematada con una viga de hormigón armado. La viga se sitúa por encima de la línea de congelación

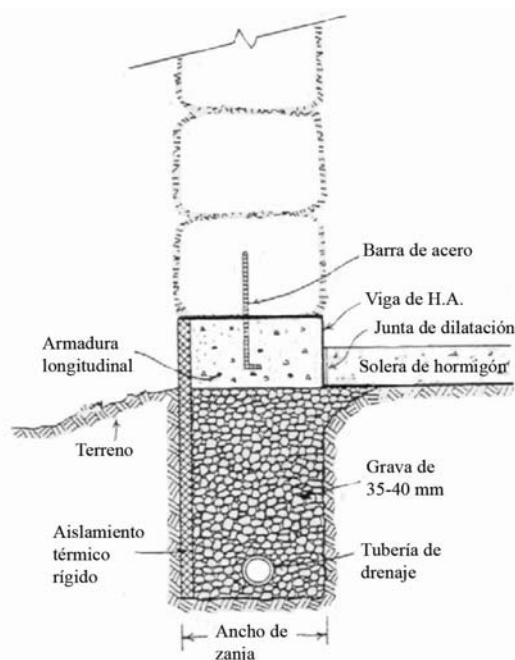


Fig. 12.14- Propuesta de cimentación de hormigón. [Athena Swentzell et. al. op. cit.]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

mientras que la zanja se extiende por debajo de ella. El peso del edificio es distribuido por la viga de forma uniforme y es transferido a la tierra por las piedras que llenan la zanja. La zanja de escombros suele tener el mismo tamaño que una de hormigón.

Los cimientos, tradicionalmente, se extienden bajo la línea de congelación porque el suelo se expande cuando el agua se hiela. Este fenómeno puede levantar parte del edificio haciendo que los cimientos se derrumben. El enfoque clásico es extender los cimientos por debajo de la línea de congelación ya que el suelo bajo los cimientos no se helará. A menudo, esto tiene como resultado unos cimientos muy profundos y caros. El método de la zanja de escombros reemplaza el hormigón bajo el nivel del suelo con zanja bien drenada rellena de roca. La roca es mucho más barata que el hormigón y, mientras la zanja no contenga mucha agua estancada, no puede helarse y levantarse. Hay que hacer preparativos para drenar el agua que se acumule en el fondo de la zanja que puede ser por medio de una tubería de drenaje¹.

Las zanjas tienen que ser tan anchas como la viga y el aislante térmico va de la parte superior de los cimientos hasta el fondo de la zanja de escombros. Lo ideal sería colocarlo tanto por la parte exterior como por la interior. De esta forma, el de la parte interna ya estaría en continuidad con el de la solera.

12.2.2.5 Cimientos de neumáticos de automóvil rellenos con piedras

Huecos rellenos con
piedras posteriormente
recubiertas

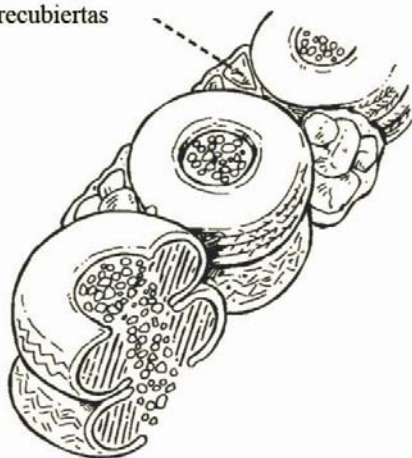


Fig. 12.15- [Barbara Johes, op. cit.]



Fig. 12.16- Cimiento de neumáticos. [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

En la última fila de neumáticos se pueden colocar trozos de vidrio de botellas rotas para evitar el ascenso de cualquier tipo de roedor que pueda llegar a la base del muro.

¹ CONFER – Barbara Johnes, op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Ventajas

Al igual que alguno de los casos anteriores es fácil de realizar su ejecución aún sin previa experiencia. Los neumáticos se pueden conseguir gratis en la mayoría de los garajes. Además, es una buena forma de darle una utilidad a un producto que ha terminado su vida útil.

De esta forma no es necesario utilizar una lámina impermeabilizante entre la cimentación y las balas porque esta función ya la realizan los neumáticos.

Puede llegar a resultar entretenida su realización.

Inconvenientes

Es un trabajo relativamente intenso por lo que puede resultar caro si hay que pagar la mano de obra. Parte de este trabajo está destinado a seleccionar los neumáticos para que todos sean del mismo tamaño.

Este tipo de cimentación no resulta muy bonita, aunque eso es según los gustos de cada uno. Por esta razón sería necesario recubrirlos de alguna forma.

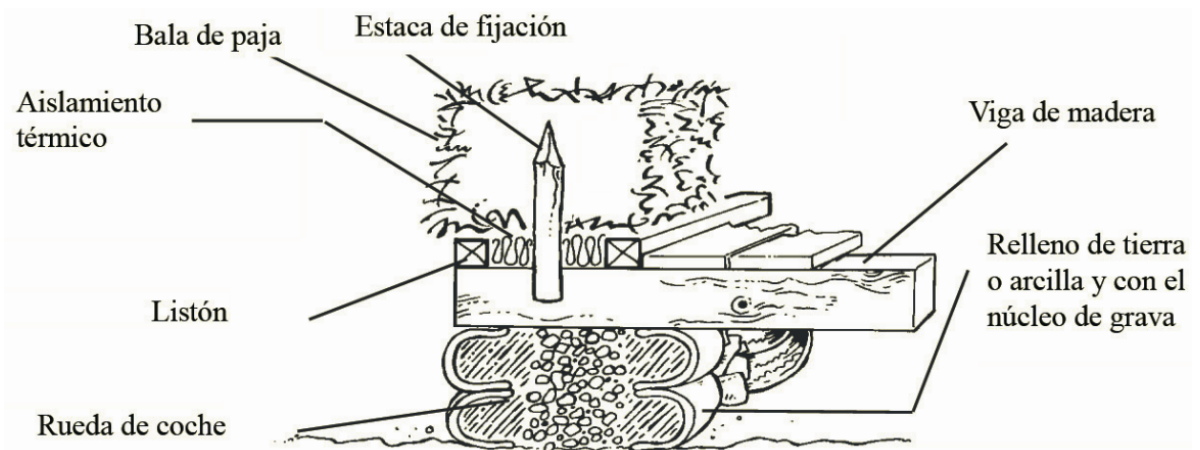


Fig. 12.17- [Barbara Johes, op. cit.]

12.2.2.6 Losa de cimentación superficial aislada térmicamente

Un ejemplo de este tipo de cimentación se puede encontrar en uno de los refugios para una comunidad india estudiados en el libro de Nathaniel Corum¹.



Fig. 12.18- [Nathaniel Corum, op. cit.]

¹ Nathaniel Corum. Building a Straw Bale House: The Red Feather Construction Handbook. Primera edición. New York: Princeton Architectural Press, 2005. 181p. ISBN 1-56898-514-2

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO



Fig. 12.19- [Nathaniel Corum, op. cit.]

Si nos fijamos simplemente en la figura 12.19, puede parecer que se trata de una losa de cimentación de espesor continuo. En la primera imagen se puede ver que el mayor espesor está en el perímetro, que es la zona que va a soportar la carga de las paredes de balas de paja. En esta imagen también se aprecian las conducciones de líquido de la calefacción por suelo radiante. Es un buen sistema de calefacción pero en este caso no está correctamente preparada la zona. El aislamiento térmico del perímetro está bien pero lo debería tener también por la parte inferior de la solera, bien en planchas de poliestireno extruído o de cualquier otra forma. Tal como aparece en la fotografía, el calor no se fugará por el perímetro pero sí por la parte inferior de la solera. Por otro lado, las canalizaciones de líquido se deben colocar en el medio de una capa de mortero, y no en la parte inferior como quedaron en este caso.

Un tipo de solera que podría funcionar bien en este caso sería el siguiente:

La excavación se haría de espesor constante en toda la zona y lo primero que se extiende en el fondo es una lámina a modo de barrera de vapor. Sobre ésta se extiende una capa de unos 10 cm. de hormigón. Una vez que este esté endurecido se colocan en toda la extensión balas de paja. Se separarán del perímetro unos 50 cm. para que esta zona sea de hormigón macizo para soportar la carga de las paredes. Además, entre las balas se deja una separación de unos 15 cm. para que penetre el hormigón formando una retícula. El hormigón recubrirá este lecho de balas unos 5 cm. dentro de los cuales estará embebida la malla electrosoldada. Sobre esta última capa se colocan las canalizaciones de la calefacción que quedarán inmersas en la última capa que podría ser la de acabado.

Por supuesto, el perímetro de la solera debe ser convenientemente drenado con una tubería a la altura de la cara inferior de la cimentación.

El sistema de las fotografías no lo tiene pero sería necesario diseñar una forma de fijación de la primera fila de balas a la cimentación, posiblemente con unas barras de acero empotradas en el hormigón. La colocación de estas barras debe ser muy bien estudiada para que coincida con las balas y no con las juntas.

En las siguientes fotografías se puede ver la forma de resolver el aislamiento térmico de la base y la impermeabilización en esta misma zona, que sí están correctamente resueltas.

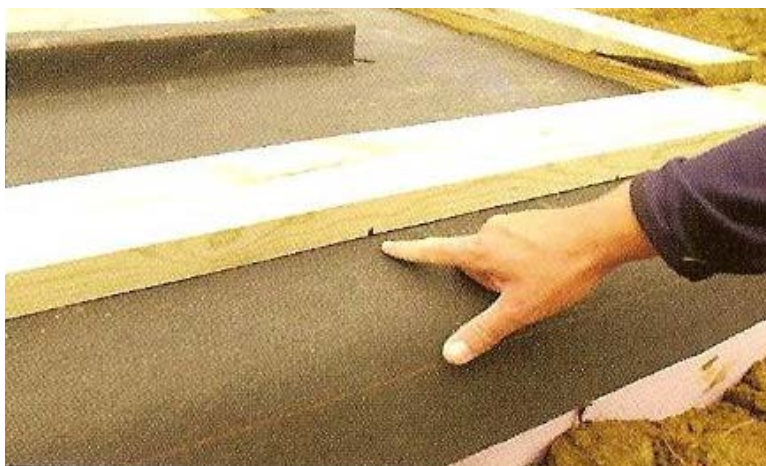


Fig. 12.20- Perforación para la evacuación de las posibles condensaciones en la base de la pared [Nathaniel Corum, op. cit.]



Fig. 12.21- Colocación de aislamiento térmico en la base de la pared [Nathaniel Corum, op. cit.]

12.2.3 Dimensionado de cimentación

La cimentación no tiene por qué ser tan ancha como la pared, esto depende de cómo queramos que funcione ésta. El espesor medio de una pared con el recubrimiento puede estar en torno a los 45 cm. De este espesor, los aproximadamente 5 cm. de material de recubrimiento que hay por cada lado no tienen por qué soportar carga. De esta forma reducimos el ancho de la cimentación al espesor de la bala de paja. Aparte de esto es posible que sea necesario dejar un espacio de aproximadamente 10 mm. entre la parte inferior del recubrimiento y el elemento inmediato inferior que será el pavimento. La razón es que cuando el muro se vea sometido a diversas acciones no provoque la figuración del recubrimiento en esta zona. Una forma de ocultar esta separación podría ser con un elemento a modo de rodapié fijado o adherido al pavimento y simplemente apoyado o sellado con el paramento vertical. De este modo tapamos esta zona y permitimos el pequeño desplazamiento vertical que pueda sufrir el muro y con éste el recubrimiento.



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Los ejemplos anteriormente citados han sido utilizados con éxito en construcciones en el Reino Unido e Irlanda. También es posible usar estos diseños en combinación pero siempre teniendo presentes las siguientes consideraciones¹:

- Elevar las balas del suelo unos 50 cm.
- Fijar las balas a la cimentación, bien con estacas o con redondos de acero.
- Elevar la primera fila de balas unos 10 mm. con respecto al suelo en las estancias en las que haya canalizaciones de agua.
- Proteger las balas de la humedad tanto en la parte superior como en la inferior.

12.2.4 Características de los cimientos

Los cimientos deben ser hechos a medida para acomodar la anchura y la carga de los muros de fardos. Deben ser lo suficientemente altos para proteger la humedad de la parte baja del muro y deben contar con un drenaje perimetral para alejar el agua de los muros.

Se suele incluir, como parte de los cimientos, una provisión para sujetar la primera fila de fardos. El método más corriente ha sido colocar barras de refuerzo verticales empotradas en los cimientos. Lo ideal sería que estas alcanzaran a llegar a la mitad de la segunda fila y que estuviesen repartidas de forma que hubiese 2 barras por cada bala. Con estructuras de carga suelen situarse puntos de anclaje en los cimientos para sujetar las placas de tejado a la base del muro².

12.2.5 Muros de contención con fardos de paja

Michel Bergeron, de ArchiBio, en Québec, utiliza moldes con un espacio doble para acomodar la anchura de los fardos, y con unos 5 cm. extra a cada lado. Cuando los moldes están listos, se vierten unos 5 cm. de hormigón y después se coloca una fila de fardos en ellos. Después se vierte más hormigón alrededor y sobre los fardos hasta que unos 5 cm. de hormigón coronen todo el muro. Impermeabiliza el exterior del muro y lo utiliza como unos cimientos muy aislados³.

¹ CONFER – Barbara Johnes, op. cit.

² CONFER - Athena Swentzell et al., op. cit.

³ CONFER - Athena Swentzell et al. Traducción al Español de: The Straw Bale House: Designing and Building With a Resource-Efficient Material. Chelsea Green Publishing Company, 1994. 300 p. ISBN 0930031717





12.3 Técnicas constructivas

12.3.1 Introducción a las técnicas constructivas

Se ha utilizado una gran variedad de sistemas para construir muros a partir de materiales embalados, aunque muchos nuevos aún tienen que ser estudiados y perfeccionados¹. Cada tipo de construcción parece añadir otra contribución o mejora al mundo de la construcción con fardos. La versatilidad de los fardos como material de construcción hace posible que sean usados en una gran variedad de estilos, métodos, materiales y variaciones del ingenio individual. Algunos de los métodos que se usan han nacido de la necesidad; las históricas casas de Nebraska, por ejemplo, usaban fardos de paja para los muros de carga debido a la escasez de otros materiales de construcción.

Las distintas técnicas constructivas conocidas hasta el momento que emplean las balas de paja son las siguientes:

- Autoportante o “estilo Nebraska”
- Autoportante con estructura ligera
- Autoportante con relleno de mortero
- De paja como relleno o con estructura auxiliar
- Otras técnicas

12.3.2 Autoportante o “estilo Nebraska”

Este es el método de construcción original inventado por los colonos que llegaron a esta región de los Estados Unidos. En este método las balas soportan el peso del tejado o del forjado sin la colaboración de ningún tipo de estructura auxiliar. Las balas son colocadas unas junto a otras como grandes bloques de construcción, unidas con la cimentación y unas con otras por medio de estacas de madera. En la coronación del muro cuentan con una estructura de madera de transmisión de carga. Esta estructura de madera es fijada a la cimentación bien con cables, cuerdas o listones. Esta es una forma de evitar grandes desplazamientos de la estructura de coronación y de las balas de paja. Por encima de esta estructura se construye lo que sea necesario de forma normal. Las ventanas y las puertas se colocan cercadas por unos marcos estructurales que son fijados a las balas según la pared va avanzando en altura.

Este es el método más sencillo y el más divertido pero requiere conocimientos previos acerca de la construcción de la pared. Los autoconstructores suelen preferir este método por su simplicidad, facilidad de diseño y mínimo uso de madera². Además, destacan con respecto a cualquier otro método de construcción que es una experiencia enriquecedora poder realizar algo entre varias personas que prestan su colaboración.

¹ CONFER - Athena Swentzell et al. Traducción al Español de: The Straw Bale House: Designing and Building With a Resource-Efficient Material. Chelsea Green Publishing Company, 1994. 300 p. ISBN 0930031717

² CONFER – Barbara Johns. Information Guide to Straw Bale Building [on line]. Amazon Nails, 2001. [Consulta: 27 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.strawbalefutures.org.uk>>



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Ventajas

Es sencillo de ejecutar y fácil de diseñar siguiendo unos principios básicos de diseño.

Se pueden hacer formas curvas o circulares sin gran dificultad y no requiere mucha exactitud en su ejecución. Una pequeña desviación en la plomada no debería tener grandes consecuencias negativas ya que la superficie de apoyo es elevada.

Es un método de rápida ejecución.

Inconvenientes

Es imprescindible que la paja se mantenga seca durante todo el proceso de construcción y hasta que se aplique el recubrimiento. Esto puede resultar difícil en una construcción grande o en una que está siendo construida de forma lenta.

El diseño de las aberturas tales como ventanas, puertas o galerías se ve reducido a menos del 50% de la superficie de pared.

Se debe esperar un tiempo prudencial antes de aplicar el recubrimiento para evitar posibles fisuras causadas por el asiento de la estructura. Además, es necesario hacer un buen diseño de transmisión de las cargas para que no se agriete éste.

Estructuras de coronación o de base

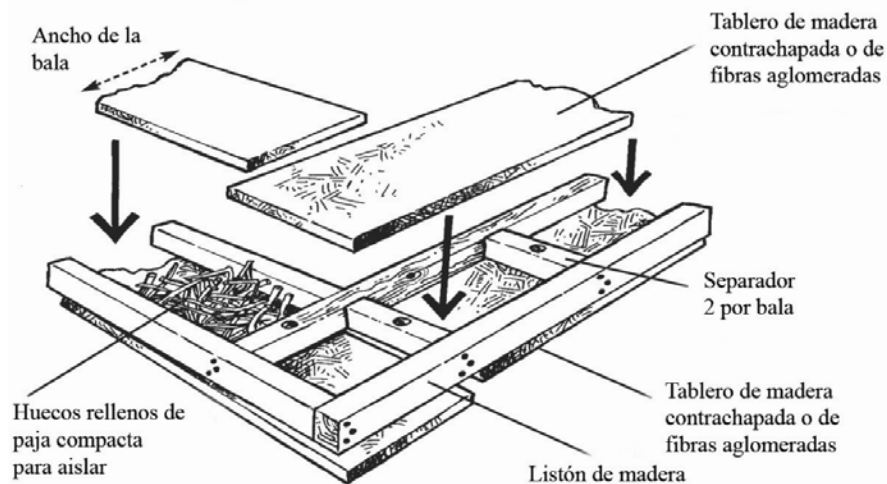


Fig. 12.22- Estructura de coronación [Barbara Jones, op. cit.]

Ésta es una estructura rígida perimetral que se coloca a modo de coronación de las paredes de balas de paja. Normalmente se hace de antemano por partes para facilitar su colocación y una vez que están en posición se fijan de forma segura. El tamaño de los listones está en función de la carga que deba soportar. Existen otros tipos de diseños aparte del visto anteriormente. Por ejemplo, una de estas estructuras situadas en la primera planta puede incluso incorporar ya las vigas.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Esta estructura de coronación podría ser metálica o incluso de hormigón, aunque esta última es menos apropiada.



Fig. 12.23- Estructura de coronación colocada [Barbara Jones, op. cit.]



Fig. 12.24- Transporte de la estructura de coronación [Barbara Jones, op. cit.]

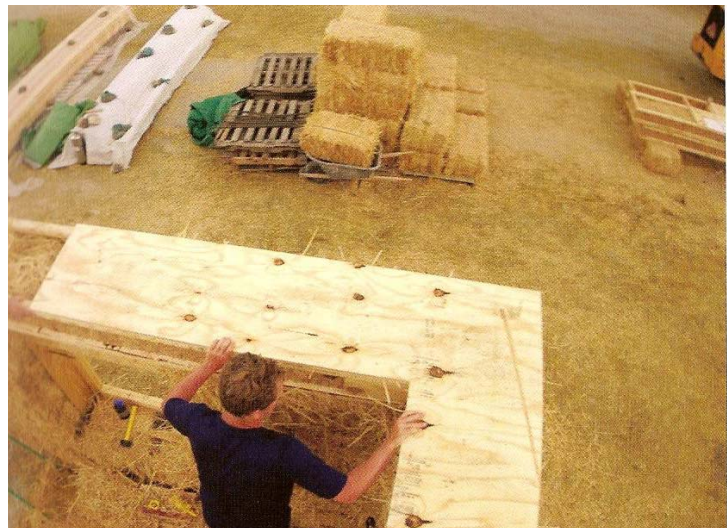


Fig. 12.25- Remate de la estructura de coronación [Barbara Jones, op. cit.]

Razones para utilizar las estructuras de coronación

- Distribuyen la carga del forjado de forma uniforme a través del ancho de la pared y en todo el perímetro del edificio.
- Proporciona un perímetro rígido que se pueda anclar a la cimentación y tensar para hacer la estructura resistente a esfuerzos horizontales.

Una vez que esta estructura está en posición, cualquier deformación que las paredes pudieran haber sufrido a causa de su flexibilidad puede ser corregida. Además, se pueden ajustar las paredes a su alineación y comenzar a realizar las conexiones de esta estructura con la pared. Esto se puede hacer a través de las



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

perforaciones realizadas en los separadores de la estructura de coronación bien con barras metálicas o con piezas de madera¹.

Hay algunos principios básicos que requieren atención a la hora de construir muros de fardos. El punto más importante es entender que los fardos son un material de construcción comprimible, en contraste con los materiales convencionales de muros, los cuales no se comprimen. Las cargas de coronación harán que los fardos se compriman, y cuanto mayor sea el peso, mayor será la compresión. Con fardos muy densos y compactos y cargas normales, la compresión puede ser mínima, pero, incluso en estas condiciones, el diseño de tejados y las puertas y ventanas pueden concentrar cargas en ciertas áreas y causar problemas².

Si este tipo de muros no tiene aberturas y el peso de la cubierta se distribuye equitativamente en todos los muros del edificio, la compresión será, en teoría, igual en todos los paneles del muro. En la realidad, las diferentes configuraciones de cubierta y los diseños de las puertas y ventanas crean una carga desigual en los paneles del muro, que, a menudo, desembocan en una compresión desigual de los fardos del muro. Los problemas resultantes pueden variar de mayor a menor, dependiendo de la cantidad de diferencia en las cargas y la densidad de los fardos, así como del diseño de la estructura de coronación, puertas y ventanas.

Por ejemplo, cuando el espacio entre puertas y ventanas deja sólo columnas estrechas de fardos entre ellas, estas columnas pueden estar sometidas a una mayor carga que el resto de los paneles de la pared. Esto es especialmente cierto cuando se utilizan dinteles ya que estos elementos cogen la carga de encima de la abertura y la distribuyen a las columnas de los fardos a ambos lados de ella. Puesto que los fardos próximos a la abertura ya soportan la carga normal de la cubierta, esto puede incluso doblar la carga en estos fardos, dando como resultado una compresión adicional. También es importante no mezclar fardos que soporten grandes pesos y soportes estructurales no comprimibles en la misma sección del muro³.

Las estructuras más pequeñas y simples, así como aquellas con menores aberturas para ventanas, naturalmente tendrán menos problemas. Una estructura de coronación suficientemente rígida en la vertical del plano para evitar que se doble o hunda por el peso ayudaría bastante a igualar la distribución de cargas en la cubierta. Cuanto más efectiva sea esta estructura de reparto de cargas de cara a no deformarse, menos posibilidades habrá de que la carga se distribuya irregularmente. Los muros de carga han ido mejor tradicionalmente en pequeñas estructuras o diseños relativamente poco complicados, con pocas y pequeñas ventanas.

¹ CONFER – Barbara Jones, op. cit.

² CONFER - Athena Swentzell et al. , op. cit.

³ CONFER - Athena Swentzell et al. , op. cit.



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

12.3.3 Autoportante con estructura ligera

Este diseño ha sido promovido por Bárbara Jones de Amazon Nails. Con este se aprovechan los beneficios del estilo autoportante pero construyendo la estructura de cubierta antes de las paredes. De este modo se puede ofrecer cierta protección a la pared de balas mientras se están ejecutando. Se utiliza una estructura ligera de madera que es tan poco resistente que no se puede mantener en pie por si sola. Requiere un refuerzo temporal mientras las balas no se colocan en su lugar. Las balas de paja son la parte esencial para la integridad estructural, por encima de la madera, y trabaja en conjunto con ésta para soportar el peso de la cubierta o del forjado. Los soportes de madera se colocan en las esquinas y a cada lado de las ventanas y las puertas. Están diseñados de forma que permita el descenso de la estructura de coronación para aplicar la compresión necesaria a la pared¹.

La compresión de la pared es esencial para la estabilidad. Para aumentar esta estabilidad, las balas pueden ser inmovilizadas externamente por medio de listones que se fijan a la base y a la estructura de coronación una vez que se ha completado la compresión de la pared. Estos listones se colocan 2 por cada bala. Cada par de listones enfrentados en cada lado de la pared se atan el uno al otro con cuerda de embalar. La pared se debe construir con una altura entre 10 y 15 cm. superior a la definitiva. Esta magnitud es la que se espera que descienda la estructura de coronación una vez aplicada la energía de compresión.

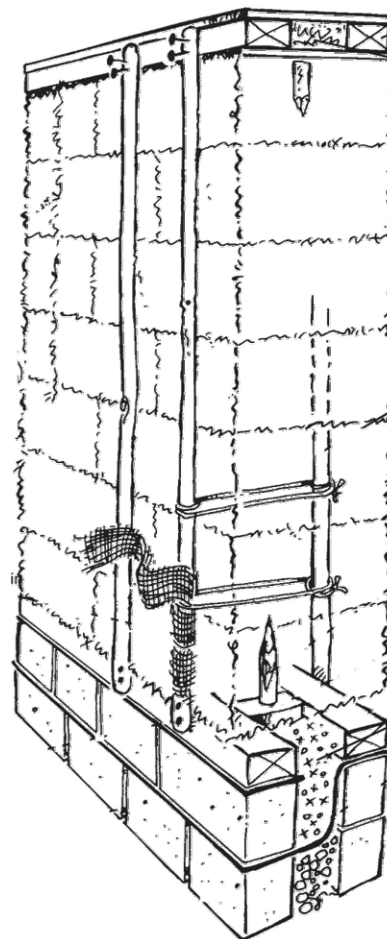


Fig. 12.26- [Barbara Jones, op. cit.]

Ventajas

La estructura de cubierta se puede terminar antes de construir las paredes, garantizando cierta protección climática durante la ejecución de las paredes.

La estructura ligera no es necesario construirla en el sitio de forma que se facilita su fabricación.

Las puertas y las ventanas tienen un poco más de estabilidad que en el estilo puramente autoportante (Nebraska).

La cantidad de madera requerida es mucho inferior que en un sistema de estructura completa de madera.

¹ CONFER – Barbara Jones, op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Inconvenientes

Es un estilo más complicado de realizar que el autoportante.

Es necesario tener mucha habilidad para proporcionar estabilidad a la estructura mientras no han sido colocadas las balas de paja.

Métodos de formación de estructura ligera

En los sistemas de construcción con balas de paja que utilizan una estructura, las ventanas y las puertas tienen unos soportes verticales a cada lado que van de la base a la coronación. Estos postes pueden ser de varios diseños. En los sistemas que emplean una estructura resistente se utilizan soportes sólidos mientras que en los sistemas autoportantes con estructura ligera se utiliza una configuración de soporte y coronación que permita el descenso de esta última¹. Un ejemplo de este sistema se puede ver en la figura 12.27.

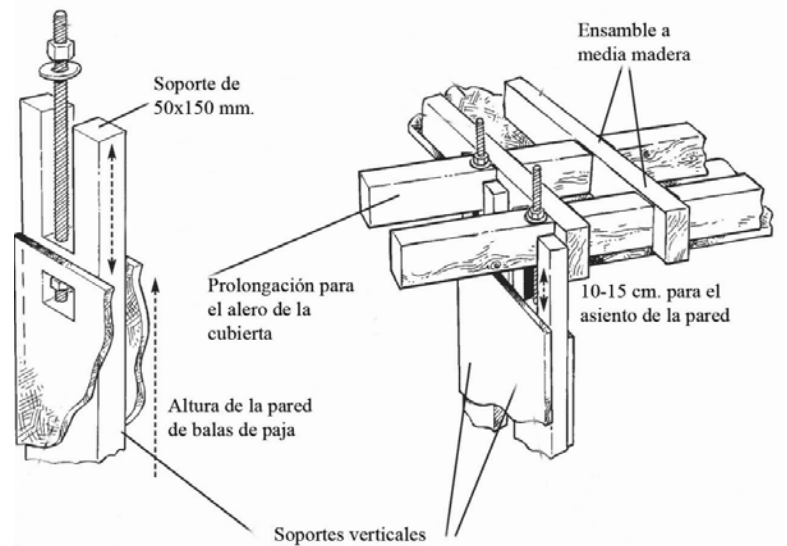


Fig. 12.27- [Barbara Jones, op. cit.]

Las barras de acero roscadas deberían estar exactamente en el cruce de las estructuras de coronación porque de lo contrario, el soporte no podrá ser ocultado en el interior de las paredes. Además, las piezas de madera que atraviese deben ser las que queden por la parte de arriba en el ensamble a media madera para que estas mismas transmitan la fuerza a las otras dos.

12.3.4 Autoportante con relleno de mortero

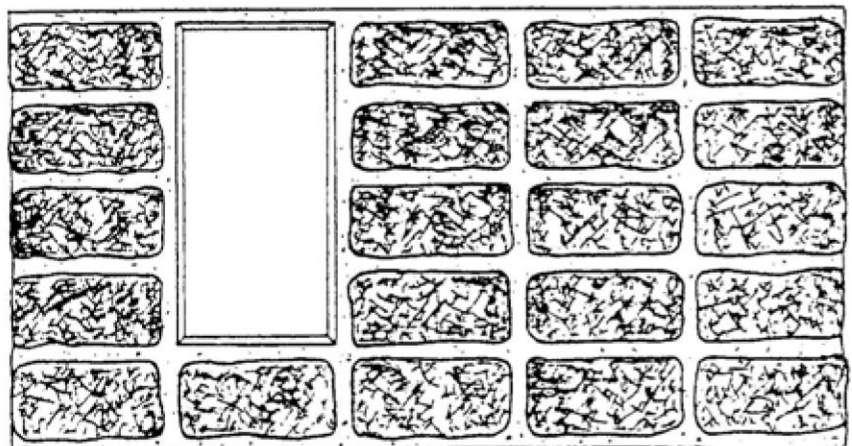


Fig. 12.28- Athena Swentzell et.al. op. cit.

¹ CONFER – Barbara Jones, op. cit.

Usar mortero entre los fardos proporciona más estabilidad al muro y lo hace más rígido y, como los huecos entre fardos están llenos de mortero, el muro será también mucho más firme. Este sistema es especialmente útil si los fardos son débiles, si se espera que la construcción tenga que soportar nieve o si se va a construir más de una planta. También se pueden añadir redondos de acero en las juntas para dar aún más estabilidad al mortero¹. Por otro lado, hay que decir que el proceso de construcción se hace más lento.

La versión más antigua de este tipo de construcción se encontró en China.

12.3.5 De paja como relleno o con estructura auxiliar

En este método, el peso de la cubierta o del forjado es soportado por una estructura de madera, acero u hormigón, y las balas son simplemente bloques que conforman el cerramiento colocados entre los soportes. Éste quizás sea el que más confianza le ofrezca a cualquier persona que pretenda hacer una construcción con balas de paja. De este modo no tenemos que preocuparnos tanto de las características de las balas de paja; sigue siendo importante que sean de buena calidad pero no tanto como en los casos anteriores porque, en este caso, ya no tiene que cumplir una función que era muy importante y que era la estructural. Este método requiere un elevado nivel de habilidades para crear estructuras, tanto de madera como de acero o de hormigón². De todos modos, sigue siendo necesario el uso de algún sistema de fijación de unas balas a otras como por ejemplo el clavado con estacas de unas a otras.



Fig. 12.29- Fachada con grandes vanos en vivienda de balas de paja con estructura auxiliar [Paul Downton, www.austbale.org]

Aparte del típico caso de vigas apoyadas en soportes situados cada 5 o 6 metros, existen otros como el de la siguiente imagen.



Fig. 12.30- Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.

¹ CONFER - Athena Swentzell et al. , op. cit.

² CONFER – Barbara Jones, op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

En este caso los soportes son menos resistentes que si estuviesen cada 6 metros porque están espaciados la longitud de una bala de paja. Con este sistema existen muchos posibles puntos en los que se puedan efectuar la fijación de elementos tales como una malla metálica en el recubrimiento o incluso los muebles altos de la cocina.

Ventajas

La cubierta o el forjado pueden ser contruidos antes de que la paja esté colocada, proporcionando una protección a las condiciones atmosféricas.

La estructura no tiene por qué ser contruida en el lugar de la obra.

Proporciona mayor estabilidad a las estructuras de ventana que en el caso del estilo autoportante.

Inconvenientes

Para no profesionales es más complicado de contruir de este modo que con el estilo Nebraska.

Requiere tener muchos conocimientos y habilidades para realizar la estructura.

12.3.6 Otras técnicas

Como sistema novedoso que es este sistema de construcción, existen muchas aportaciones personales para que, combinando formas y materiales, se consiga mejorar ciertos aspectos del comportamiento de estas paredes. Una de estas aportaciones ha sido realizada por uno de los padres de la bioconstrucción en nuestro país, Ismael Caballero, que ha promovido el empleo del “sistema de pacas de paja a la cal”.

El proceso para trabajar con este sistema comienza excavando un agujero en el mismo lugar de trabajo, que tenga un tamaño ligeramente superior a una bala de paja. En este agujero se meterá un plástico de forma que la superficie lateral del hueco quede totalmente impermeabilizada para el siguiente paso. Éste consiste en verter cal recién apagada hasta poco más de la mitad del agujero. Posteriormente se sumergirán las balas de paja en esta pasta durante unos segundos para que el producto penetre en la bala. Después de este tiempo se retiran y se colocan en su posición en la pared. Cuando la cal se seca, el resultado final es un bloque compacto¹. De todos modos, no está de más seguir utilizando estacas para mejorar el enlace de unas con otras.

Si se aplica correctamente, es una buena forma de evitar que algún tipo de roedor pueda llegar a penetrar por entre las balas, sobre todo por la parte inferior de la pared.

Esta técnica constructiva se puede emplear tanto

si se trata de muros de carga como si las balas sirven de cerramiento sin función estructural. Uno de los inconvenientes que tiene es que las balas, una vez empapadas con la pasta de cal, aumentan considerablemente su peso, dificultando así su colocación en situaciones altas de los muros. Para resolver



Fig. 12.31- EcoHabitar. N°11. Otoño de 2006. Olba, Teruel.
Ed. ECOHABITAR S.L. ISSN:1697-9583

¹ CONFER – Luís Lázaro. Bioconstrucción con balas de paja [on line]. Madrid, 4 de Julio de 2005. [Consulta: 17 Agosto de 2006]. Disponible en web: <<http://www.revistanatural.com>>

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

este problema surge una variante de la técnica que consiste en verter la cal con unos cubos sobre las balas una vez colocadas en su posición, como muestra la imagen.

12.4 Ejecución de las paredes

12.4.1 Proceso de ejecución

A pesar de la posición que ocupa la estructura para transmisión de cargas en coronación, en el caso de muros de carga, lo primero que se debe hacer, una vez que ha sido terminada la cimentación, es construir esta estructura de forma que tenga exactamente las mismas dimensiones que la cimentación. Una vez hecho esto se puede comenzar con la ejecución de la pared¹.



Fig. 12.32- Construcción de la estructura de coronación [Nathaniel Corum, op. cit.]

Para paredes largas es recomendable utilizar guías en las esquinas para que estas queden verticales. Las guías deben ser tan altas o más que la propia pared.



Fig. 12.33- [Nathaniel Corum, op. cit.]

¹ CONFER - Nathaniel Corum. Building a Straw Bale House: The Red Feather Construction Handbook. Primera edición. New York: Princeton Architectural Press, 2005. 181p. ISBN 1-56898-514-2

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Estas guías son fácilmente construidas uniendo en ángulo recto dos tablas de encofrado de la misma longitud. La parte inferior de esta pieza se fija a la estructura de cimentación y la parte superior se sujeta con un tornapuntas por cada lado una vez que se confirme su verticalidad colocando un nivel de burbuja de aire por las dos caras. Las guías se retirarán una vez se haya terminado de levantar el muro por lo que el sistema de fijación de éstas no debe ser demasiado consistente¹.

Colocar los fardos es la parte más divertida de la construcción, si hay mucha gente que se encargue de esta tarea y una persona que se encarga de supervisar el conjunto. Es de mucha ayuda contar con los planos alzados del muro para tener una referencia periódica. Antes de colocar las balas en su sitio se le puede aplicar una solución de bórax para eliminar los insectos que puedan tener o los que puedan llegar a penetrar en el muro.

Cuando las balas se colocan en posición horizontal se incrementa su estabilidad. Esto es importante sobre todo cuando se trata de estructuras portantes. Los fardos también se pueden colocar en sentido vertical, pero están menos aconsejados para este tipo de sistema constructivo y más para los que cuentan con una estructura auxiliar.

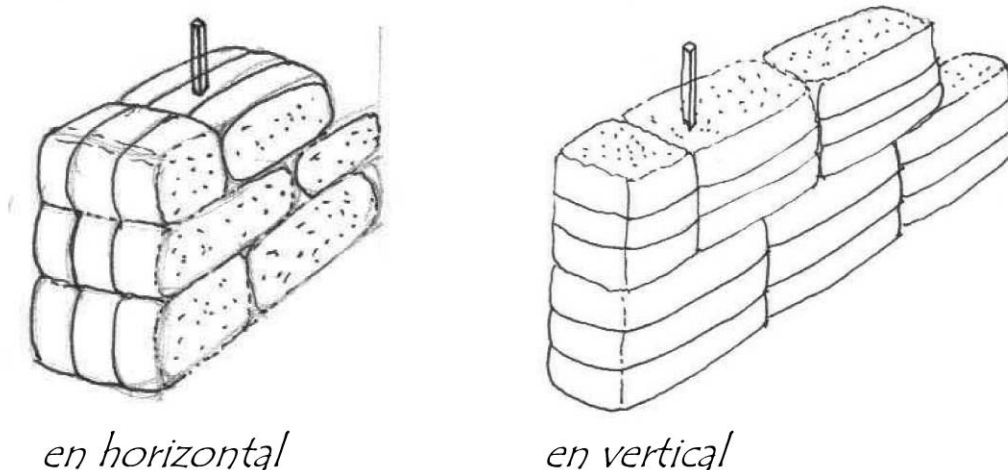


Fig. 12.34- Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.

Antes de iniciar la ejecución del muro deben estar hechas las estructuras para las puertas y las ventanas. Las estructuras de las puertas deben ser fijadas de forma segura a la cimentación antes de colocar las balas. Las estructuras de las ventanas se colocan en las paredes según estas van subiendo en altura y son fijadas en la base y los laterales con pasadores de madera o metálicos, como se aprecia en la figura 12.35.

¹ Nathaniel Corum, op. cit.



Fig. 12.35- [Nathaniel Corum, op. cit.]

Antes de ponerse a colocar las balas es necesario tener la base sobre la cual se van a colocar éstas. Esta base debe tener, si no forman parte ya de la propia cimentación, los elementos de fijación de las balas. La primera fila de balas debe ser colocada lentamente y con cuidado ya que será la plantilla que servirá para colocar las demás filas. Es importante que las filas de balas vayan a plomo por las dos caras y que cumpla exactamente lo reflejado en los planos, si existen. Las primeras balas que se colocan son las de las esquinas y las adyacentes a cualquier soporte vertical, incluso los marcos de las puertas. Algunas puede ser que tengan que ser modificadas para que encajen en el sitio. El proceso de modificación del tamaño de las balas ya se ha visto anteriormente. Éste puede ser realizado por dos personas con práctica en 5 o 10 minutos. Cuando se modifica una bala es mejor que sea más bien pequeña que grande. En caso de que resulte pequeña se puede rellenar el hueco con paja suelta¹. Los huecos de menos de 15 cm. se pueden rellenar con paja suelta sin embalar, y es mejor dejarlo un poco flojo antes que apretarla demasiado ya que podría desplazar a las balas contiguas. Se debe evitar colocar pequeñas balas cerca de las esquinas u otro lugar más débil.

Aparte del cuidado que hay que tener en la ejecución del muro, se debe comprobar la verticalidad del mismo cada cierto tiempo. Una vez que ha sido colocada la primera fila de balas, la siguiente se debe colocar de forma que no exista continuidad en las juntas verticales para mayor estabilidad del muro.

Si se desea hacer una pared algo curva se puede hacer curvando cada una de las balas, no en el sentido en el que se curvan cuando de agarran por las cuerdas sino en el perpendicular. Se debe hacer con cuidado de no pasarse de fuerza aplicada porque podemos hacer que se suelte una de las cuerdas que tiene².

12.4.2 Ataduras coronación-cimentación

En las estructuras de muros de carga es importante atar la base del muro a la coronación para aplicar una precompresión. Esto evita que el viento se pueda llevar la cubierta y añade estabilidad estructural en caso de fuerzas sísmicas. Este tipo de paredes puede llegar a asentarse unos 3 o 4 cm por su propio peso. Si además lo sometemos a una compresión, el descenso puede ser bastante superior. Si antes de someterlo a la

¹ CONFER – Barbara Jones, op. cit.

² CONFER - Athena Swentzell et al. Traducción al Español de: The Straw Bale House: Designing and Building With a Resource-Efficient Material. Chelsea Green Publishing Company, 1994. 300 p. ISBN 0930031717

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

carga le aplicamos la energía necesaria de compresión, el descenso que se produzca una vez cargado será menor.

Muchos métodos fueron desarrollados a finales de los 80 y principios de los 90, principalmente en combinación con las estructuras de coronación hechas de madera. Como el sistema de unión debe ser incluido en la cimentación, se debe elegir el método de conexión antes de construir los cimientos.

Cables y correas

Un buen método para anclar la estructura de coronación puede ser el empleo de cables metálicos o correas de poliéster. Estos elementos recorren la superficie del muro hasta la placa de reparto de cargas y son atados a los cimientos a cada lado del muro.

Cuando se usa este tipo de atado se deben usar también unos protectores de esquinas de metal o guardacabos para el cable en cualquier punto donde el cable se doble sobre alguna otra superficie, como por ejemplo en la estructura de coronación.

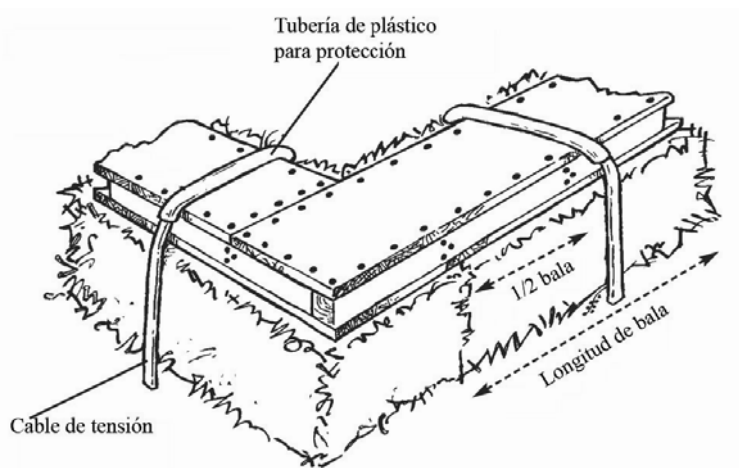


Fig. 12.36- [Barbara Jones, op. cit.]

Tom Luecke, de Boulder, Colorado, fue pionero en el uso de correas de poliéster para asegurar la estructura de coronación. Tom y el ingeniero de estructuras Jim Higer, también de Boulder, determinaron que colocar correas cada 90 cm proporcionaba suficiente resistencia en la mayoría de los casos. Una pequeña construcción con un tejado de cobertizo construido por Tom y empleando esta técnica soportó vientos superiores a 160 km/h.¹ Estas correas son las típicas que se utilizan para el embalaje de material para transportar, como por ejemplo las tejas.

En la cimentación es necesario dejar prevista una tubería por la que se hará pasar la cinta plástica. Esta tubería debe tener cierta curva en los extremos para no dañar la correa, y una vez que ésta se ha hecho pasar, se sella la canalización.

¹ Athena Swentzell, et. al., op. cit.

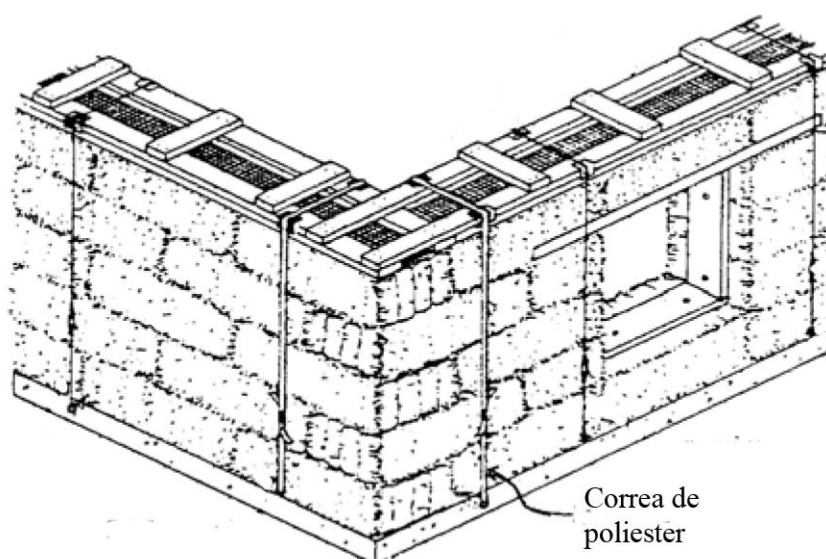


Fig. 12.37- [Athena Swentzell et. al., op. cit.]

Varillas roscadas

Uno de los métodos más comunes para crear una conexión continua entre los cimientos y la estructura de coronación es con unas barras de acero roscadas que van desde la cimentación hasta la coronación en varios puntos a lo largo de la pared. Éstas están conectadas a la cimentación, atraviesan las balas y están en conexión con la estructura de coronación. Esta es una forma fácil de aplicar la energía y para dejar la coronación perfectamente horizontal. No es tan fácil para ejecutar la pared porque habrá varias balas, cada dos filas, que se deben colocar de forma que las atraviese la barra, teniendo que levantarlas a bastante altura.

Paul Weiner, arquitecto y constructor del edificio de balas “Tree of Life Rejuvenation Center” hizo los cálculos para el atado de una pared de 30 cm de ancho. Estos cálculos determinaron que la colocación de los atados cada 1,80 metros en el muro es 20 veces más fuerte de lo necesario para soportar vientos de 120 km/h. En la zona en la que va la tuerca de apriete se debe colocar una pletina metálica para repartir la carga que le transfiere la tuerca a la estructura de coronación.

En Arizona, los constructores observaron que había sido deseable colocar todo el atado a no más de 35 centímetros de las esquinas porque cuando los muros fueron previamente comprimidos, las esquinas permanecieron más altas que el resto del muro¹.

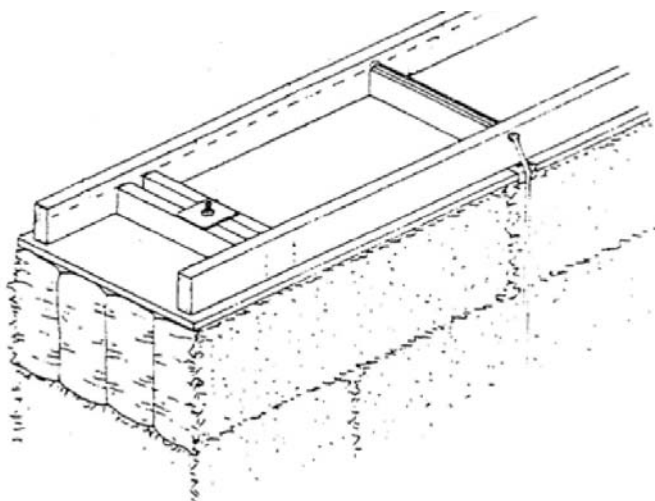


Fig. 12.38- [Athena Swentzell et. al., op. cit.]

¹ CONFER – La casa de fardos de paja

12.4.3 Fijación de las balas

Según va aumentando la altura de las hiladas se va haciendo necesaria la fijación interna de las balas de las distintas hiladas de forma que cada bala esté unida a las que tiene encima y debajo. Esto se puede ver en el dibujo de la derecha. Cada bala debe tener 2 elementos de fijación y deben estar en la zona central de ésta¹.

Cuando se produce un cambio radical de dirección, tal como ocurre en las esquinas, las balas necesitan fijarse mutuamente con estacas o algo similar. En la imagen que aparece a continuación, esta fijación está hecha con unas grapas metálicas. En cuanto a comportamiento mecánico puede ser una buena opción, pero tiene el problema de que se pueden producir condensaciones en la superficie de esta pieza que pueden perjudicar la paja.



Fig. 12.40- [Nathaniel Corum, op. cit.]

La fijación de las balas en sentido vertical también se puede realizar con barras de acero corrugado una vez que se ha realizado todo el muro. Este sistema sirve únicamente para unir las balas y evitar su desplazamiento, pero no para aplicar la energía de precompresión como se ha visto anteriormente.

En la figura 12.41 se aprecia cómo una persona (sin ninguna medida de seguridad para trabajos en altura) está clavando una barra de acero en el muro ayudada por un mazo y un trozo de tubería metálica con uno de los extremos taponados.

Si la fila inferior está fijada a la cimentación y el resto de filas están unidas entre sí y a la fila inmediata inferior, los desplazamientos relativos de unas balas con respecto a otras se ven impedidos.

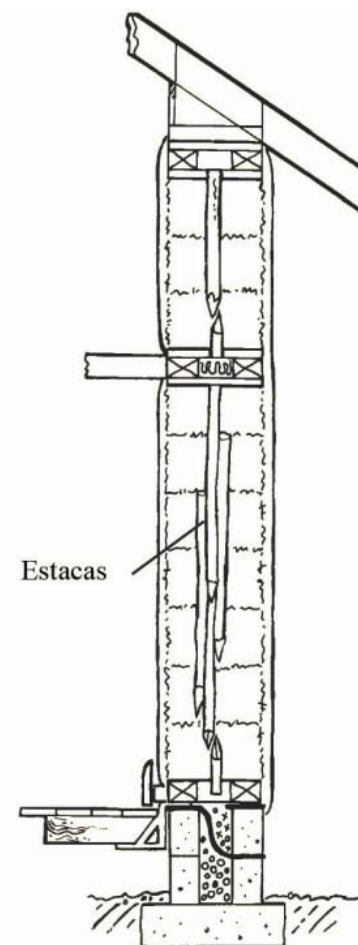


Fig. 12.39- [Bárbara Jones, op. cit.]



Fig. 12.41- [Nathaniel Corum, op. cit.]

¹ CONFER – Barbara Jones, op. cit.

12.4.4 Asientos y compresión

Lo ideal es que se seleccionen las balas de mayor densidad para la ejecución de los muros para reducir el nivel de asiento que sucede a causa del peso de las propias balas, los forjados o los tejados. Unas buenas balas sufrirán un asiento de entre 10 y 100 mm en una pared de 7 balas de altura. Por esta razón, las puertas y las ventanas deben tener un cierto margen de holgura con las balas superiores e inferiores en previsión de este asentamiento. La holgura que dejemos se irá reduciendo a medida que se va cargando el edificio. En previsión de este asiento, lo ideal, y casi imprescindible, es aplicar precompresión a la pared antes de ser cargada con el peso del forjado¹. De todos modos, la forma de trabajar con estas holguras será explicada más adelante.

12.4.5 Electricidad y conducciones de agua

En referencia a este aspecto, al igual que con otros muchos, no existen muchas diferencias con las construcciones típicas. Una posible forma sería parecida a la que aparece en el dibujo de la derecha. Un listón de madera desde la base a la coronación podría servir de elemento de fijación de las cajas de conexiones. En el dibujo aparece el cable únicamente fijado a este listón pero éste debería discurrir por un tubo corrugado fijado al listón. El tubo y el listón quedarían ocultos una vez aplicado el recubrimiento.

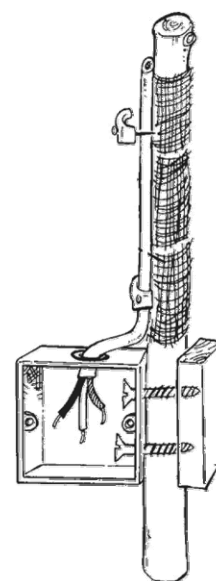


Fig. 12.42- [Bárbara Jones, op. cit.]

Otra posible forma de hacer la fijación de las cajas de conexiones eléctricas es como aparece en el siguiente dibujo. El taco de madera quedaría oculto en la bala de paja y la caja oculta por el recubrimiento. Al igual que en el caso anterior, el cable debe discurrir por una canalización propia para este fin que también quedará oculta por el recubrimiento. En último caso la instalación podría quedar vista y no sería necesario nada de lo anteriormente dicho.

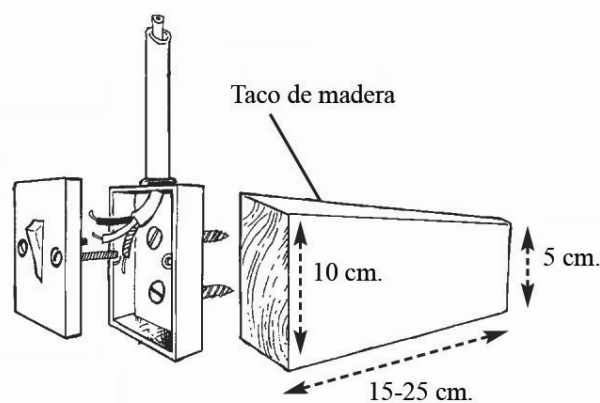


Fig. 12.43- [Bárbara Jones, op. cit.]

¹ CONFER – Barbara Jones, op. cit.



En cuando a las conducciones de agua es necesario tomar ciertas precauciones. De ser posible se debería evitar que éstas discurriesen por las paredes de paja. Es preferible que discurran por las divisiones interiores de la vivienda y si tienen que ir por las paredes de balas de paja, es mejor que sean vistas. Si por lo que sea es necesario que una de estas conducciones atraviere estas paredes se debe hacer pasar por una tubería que la envuelva por completo por dos razones. Una es que si hay cualquier fuga, el líquido no entre en contacto con la paja. La otra es que el posible vapor de agua que tenga la pared no entre en contacto con una canalización fría ya que se produciría su condensación¹.

12.4.6 Entramados horizontales

Uno de los principios de la construcción con balas de paja es el respeto por el medio ambiente y la utilización de la mayor cantidad de recursos naturales o no dañinos para éste. Quizás sea por este motivo que la gran mayoría de los elementos estructurales, quitando las balas de paja cuando actúan como tal, han sido tradicionalmente de madera. La madera es un material que está en armonía con la paja ya que en su composición tienen mucho en común. También hay que decir que cada vez tiene menos presencia en el mundo de la construcción como elemento estructural, salvo en rehabilitaciones en las que ya existía y algún caso puntual a mayores. Su uso en este sentido ha sido desplazado por el acero y sobre todo por el hormigón.

Sería posible hacer la estructura porticada tanto de acero como de hormigón, y posteriormente realizar los cerramientos con balas de paja. Habría que resolver aspectos tales como la trabazón de unas balas con otras, la conexión de la pared con las vigas inferior y superior o la protección de los elementos metálicos en contacto con la paja para evitar putrefacción a causa de la condensación en estas superficies.

Una estructura perimetral de balas de paja bien precomprimida y con una buena estructura de coronación podría servir para apoyar sobre ésta un entramado horizontal de acero. Según las distancias a salvar por las vigas, serían necesarios puntos de apoyo intermedios que podrían, o incluso deberían, ser también tramos de muros de balas de paja.

En este momento no existen datos acerca de construcciones en las que la estructura sea de hormigón y los cerramientos de balas de paja. Parece menos lógico el uso de un forjado de hormigón en esta situación ya que se trata de un material muy pesado, muy rígido y posiblemente no soportaría los movimientos estructurales propios de estas paredes.

¹ Barbara jones, op. cit.



12.5 Apertura de huecos. Puertas y ventanas

Las primeras estructuras de Nebraska utilizaban dinteles de madera sobre ventanas y puertas. Las secciones de pared solían tener pocas aberturas para ventanas, que generalmente eran pequeñas. Cuando una pared está totalmente hecha de fardos compactos se comprimirá, relativamente, de una manera uniforme si no hay aberturas en ella. Cuando se añaden aberturas para ventanas y puertas, el asentamiento se hace diferente en algunas o todas esas partes. La tendencia a un asentamiento desigual aumenta en proporción al número y anchura de esas aberturas.

La localización de los marcos de las ventanas o de las puertas debe ser decidida de antemano y a una distancia de las esquinas **superior o igual a una bala de paja**¹.

En los casos en los que los muros de paja son portantes, las puertas y ventanas deben tener algún sistema que soporte el peso de las balas, forjados y cubierta sobre éstas. En el caso de que este sistema se trate de dinteles, la longitud de empotramiento en cada lado del hueco debe ser lo mayor posible para que la carga no se concentre en una zona puntual.

La forma más sencilla de solucionar esta situación es construir un marco estructural en el que se colocará la ventana o la puerta. El diseño de estas estructuras debe tener en cuenta el hecho de que las paredes se asientan ante el peso de los elementos que soportan. Es prácticamente imposible saber cuánto asiento se producirá ya que, entre otros factores, depende de la densidad de las balas y de la cantidad de carga que soporten. En la práctica, construir este marco estructural con una altura unos 8 cm menor que un número completo de balas debería ser suficiente para absorber el asiento². Esta magnitud pudiera ser superior si a la pared no se le ha aplicado una precompresión o si la carga a soportar es elevada. A pesar de la función que tiene esta cavidad, se puede rellenar con paja suelta mientras mantiene esta dimensión. Al tratarse de paja suelta no habrá problema en que se comprima posteriormente. En el dibujo de la figura 12.44 también se rellenan de paja los módulos superior e inferior del marco estructural.

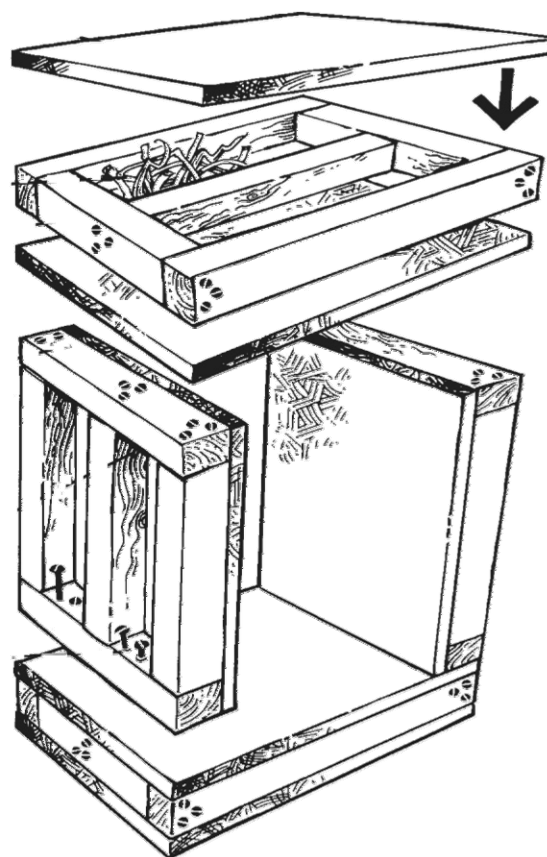


Fig. 12.44- Marco estructural de ventana [Barbara Jones, op. cit.]

¹ Athena Swentzell, et. al. op. cit.

² Bárbara Jones, op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Salvo en circunstancias excepcionales, estas estructuras deberían ser múltiplos de las dimensiones de las balas. De esta forma, las dimensiones externas de la estructura podrían ser entre media y 2 ó 3 balas de ancho y un número de balas de alto menos los 8 cm. para permitir el asiento¹.

Los tamaños reales de las piezas de madera utilizadas, en particular para la parte superior de la estructura, dependen de la carga que tengan que soportar. Esto se ve afectado por el diseño de la estructura de coronación.

Otras opciones

Para no tener que construir un marco que tenga que soportar la carga de la parte superior se puede poner en la parte superior una estructura que haga de dintel y reparta las cargas a los laterales. Esta estructura puede ser de perfiles metálicos o de madera, siendo preferible esta última opción. Se debe evitar en lo posible la colocación de materiales metálicos dentro de la pared ya que las posibles condensaciones dañarían la paja. Si este dintel se hace de madera y de forma similar a la que aparece en el siguiente dibujo, es preferible que las uniones sean mediante tirafondos².

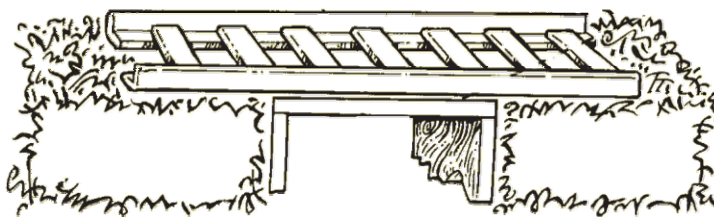


Fig. 12.45- Barbara Jones, op. cit.



Fig. 12.46- Nathaniel Corum. Building a Straw Bale House: The Red Feather Construction Handbook

En la imagen anterior se puede apreciar un premarco de madera sobre el cual descansa un dintel también de madera para soportar el peso de una fila de balas de paja y el que le transmitirá la estructura de coronación.

Otra opción, más recomendable para las ventanas que para las puertas, sería fijar la estructura del hueco a la estructura de coronación. Esta puede ser una buena opción si el diseño es de ventanas largas en el

¹ CONFER – Barbara Jones, op. cit.

² Barbara Jones

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

sentido vertical, pero el espacio libre en previsión del asiento se debe dejar en este caso en la parte baja del marco.

Otros modos de conseguir iluminación natural

Una forma muy curiosa de conseguir iluminación natural es dejando metidas en la pared garrafas de vidrio como se aprecia en las siguientes fotografías.



Fig. 12.47- Aspecto inicial [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]



Fig. 12.48- Aspecto final [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

Se trata de un sistema bello y curioso de iluminar el interior de una estancia. El vidrio de estas garrafas es grueso pero aún así se puede romper. Si esto sucede, para reparar el estropicio es necesario sustituir la garrafa por otra de igual tamaño o un poco inferior. El aire que almacena en su interior no es un buen transmisor del calor por lo que incluso funciona bien térmicamente.

Algo más conocido son los bloques de vidrio moldeado que, como se aprecia en la fotografía, también se pueden utilizar puntualmente en las paredes para permitir la iluminación.



Fig. 12.49- Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.

12.6 Recubrimientos de las paredes

12.6.1 Pasos previos a la aplicación del recubrimiento

Las casas de balas de paja han sido recubiertas tanto con malla metálica como sin ella. Anteriormente hemos visto que esta malla refuerza la estructura del edificio y le da más consistencia. Para conseguir esto, este elemento se debe fijar en la base y en la coronación del muro.

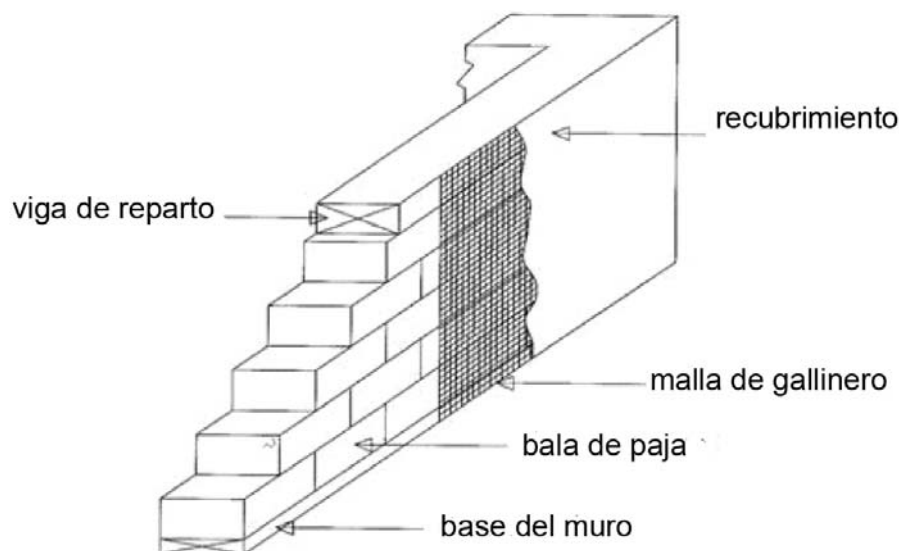


Fig. 12.50- Elementos constituyentes de un muro

Esta malla, en el caso de las paredes que inmovilizan las balas con listones de madera en vertical por las caras del muro, también se puede fijar a estos listones.

Otro sistema de fijación sería el que se podría utilizar en el caso que vimos anteriormente de estructura auxiliar con los soportes distanciados 1 metro entre sí; estos soportes tenían el espesor de las balas de paja por lo que la malla se puede fijar a los mismos.

John Parson, de Rimrock, Arizona, desarrolló un sistema eficiente para adherir esta malla a la pared. Cortó trozos de alambre de una longitud algo superior a dos veces el espesor de la pared, los dobló por la mitad y los clavó en la pared por un lado de forma que agarrasen la malla. Por el otro lado unió las dos puntas del alambre fijando con ello la malla de este lado de la pared¹.

En Mongolia, donde no disponen de este tipo de mallas metálicas, han desarrollado un sistema para aplicar el recubrimiento a este tipo de paredes. Utilizan unos listones de madera de una sección de 1x3 cm. y un par de metros de longitud que colocan en posición horizontal y separados unos centímetros unos de otros. Éstos son clavados a otros listones verticales un poco más consistentes que los anteriores y espaciados entre 1 y 2 metros. Estos listones verticales se colocan a pares, enfrentados, uno de cada lado de la pared y atados con cuerdas de atado de las balas².

¹ CONFER - Athena Swentzell et. al., op. cit.

² CONFER – S. O. MacDonald. Versión en Español de: Una introducción visual a la construcción con fardos de paja, 1999. 22p.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

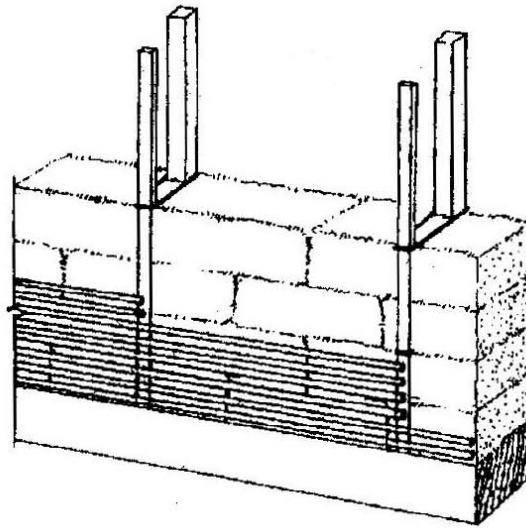


Fig. 12.51- [S. O. MacDonald, op. cit.]

En caso de utilizar malla metálica en las superficies de las paredes, se pueden combinar varios tipos de éstas. En general, en la superficie de la pared es suficiente la colocación de la típica malla metálica que hace hexágonos con el trenzado de los alambres. Otro tipo de mallas más tupidas o con otra estructura de trenzado se puede utilizar para zonas delicadas como pueden ser los huecos de puertas o de ventanas. En la figura 12.52 se puede apreciar un tipo de malla muy tupida en las jambas y el dintel de una puerta. Estas zonas necesitan un mayor agarre para el material de recubrimiento que se le aplique.



Fig. 12.52- [Nathaniel Corum, op. cit.]

Antes de cubrir toda la pared con la malla metálica, es una buena idea rellenar con paja los espacios que hayan quedado entre las balas o entre las balas y la estructuras de ventanas, puertas o estructuras en general. La intención es que los huecos se rellenen completamente con paja y no con el recubrimiento que se aplicará posteriormente.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

La malla se puede hacer que quede íntimamente unida a las balas por medio de unas piezas metálicas que se clavan en la pared como se puede ver en las siguientes figura 12.53 y 12.54.

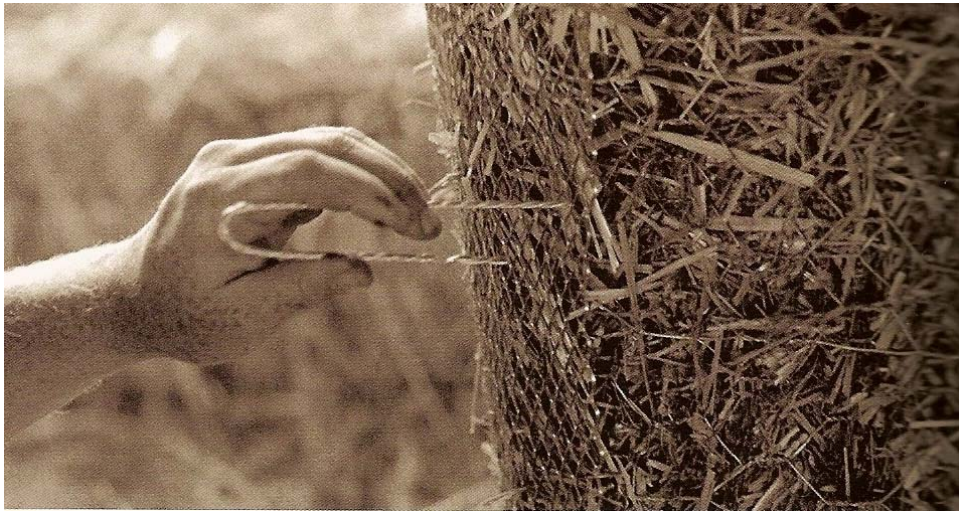


Fig. 12.53- [Nathaniel Corum, op. cit.]



Fig. 12.54- [Nathaniel Corum, op. cit.]

La zona de las ventanas y puertas, como se ha dicho antes, es un poco más delicada que las demás. Una forma de resolver estas zonas es suavizando las jambas, el alféizar y el cabecero. En el caso del alféizar, se puede fijar un trozo de malla de mayor densidad de material a la estructura inferior de la pared. Se coloca paja suelta por la parte de detrás de la malla metálica dándole la forma curva deseada y se fija ésta al marco inferior de la ventana. En el caso del cabecero de una puerta el procedimiento es similar. En el caso de la ventana, el resultado sería el que se aprecia en las figuras 12.55 y 12.56.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

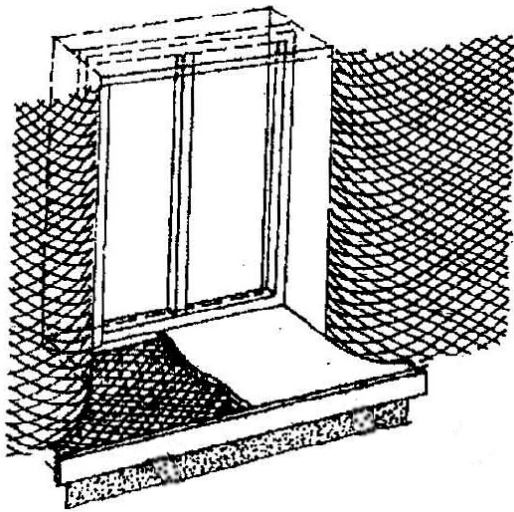


Fig. 12.55- Ventana con jambas en curva y alféizar plano [S. O. MadDonald, op. cit.]

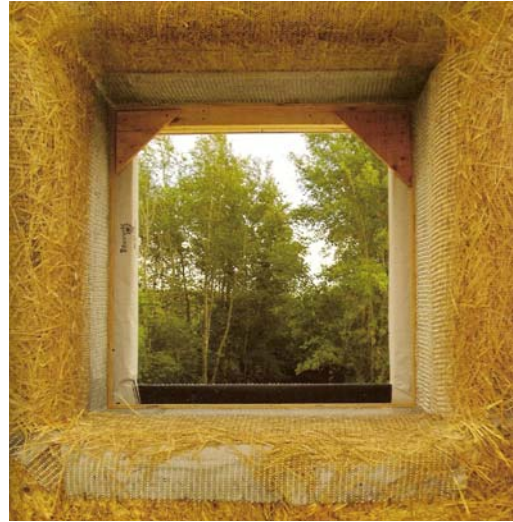


Fig. 12.56- Ventana con jambas, alféizar y cabecero curvos [Nathaniel Corum, op. cit.]

La zona baja de las ventanas es un lugar que se suele utilizar para ubicar los radiadores. Ésta es la zona más fría de la pared, bien por la transmisión térmica del conjunto de la ventana o por las posibles filtraciones de aire desde el exterior, aunque esta última opción es cada vez menos frecuente debido a la estanqueidad de las ventanas que existen en la actualidad. Si esta zona se va a destinar a tal fin, es necesario reforzarla con una estructura como la de la figura 12.57 para que soporte el peso de un radiador.

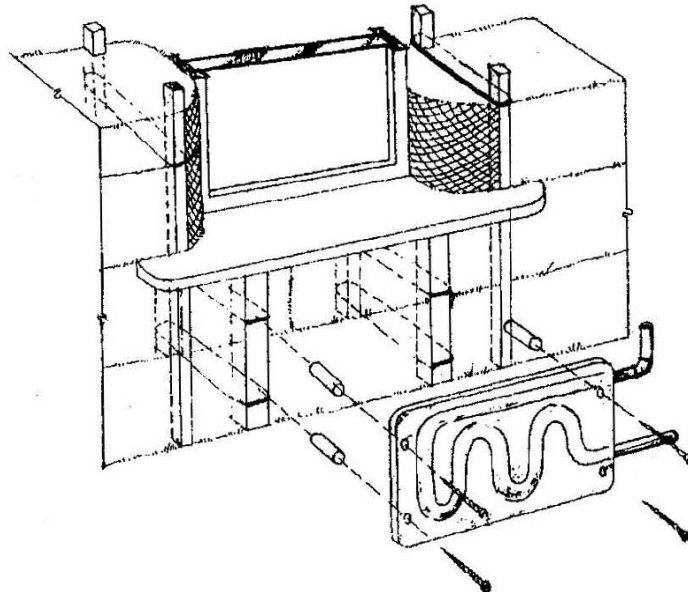


Fig. 12.57- Estructura para soportar un radiador [S. O. MadDonald, op. cit.]



12.6.2 Morteros para el recubrimiento

12.6.2.1 Introducción

Además de la estética, uno de los factores más importantes a la hora de elegir el material es la permeabilidad que tenga éste al vapor de agua. Las paredes pueden sellarse dependiendo del grado de capacidad de respirar. Una pared que deje respirar permite que el aire de fuera se caliente o se enfríe cuando pasa a través de la masa de la pared antes de mezclarse con el aire interior. Si la pared se termina con una barrera de vapor, mortero de cemento, etc., solamente permitirá un intercambio de aire muy bajo. Si por casualidad entra humedad, tardará mucho tiempo en secarse ya que no hay movimiento de aire y así facilitará la creación de hongos y la descomposición. Por el contrario, una pared con un recubrimiento permeable al vapor de agua puede ser más respirable, permitiendo una evaporación más natural¹.

Los recubrimientos ideales para las balas de paja son los que incorporen en su composición la cal o los que están hechos a base de arcilla. Estos son productos transpirables a los que se les pueden aplicar pinturas también transpirables.

12.6.2.2 Morteros de cal

La cal ha sido utilizada durante años para morteros para recibir piedras y ladrillos y como recubrimiento de edificios. Todos los países Europeos utilizaban la cal en los edificios cientos de años antes de que el cemento fuese inventado. En el Reino Unido, la producción de la cal era una industria artesanal con puntos de producción en cualquier lugar en el que fuese necesario. El procedimiento para utilizarlo y para producirlo era ampliamente conocido. No cabe duda de que estos recubrimientos son duraderos y eficientes, y con buenas cualidades para proteger las construcciones de las condiciones climatológicas.

Trabajar con cal, y hacerlo de forma correcta, requiere entender el proceso de carbonatación que devuelve la pasta al estado de piedra caliza original. Aunque es cierto que el recubrimiento de cal aplicado correctamente puede durar muchos años, existen casos de deterioro considerable de éste por lo que se deben entender las razones para no cometer los mismos errores. En esencia, la preparación de la pasta de cal es sencilla, pero variables en los materiales (cal y arena) y particularmente en la climatología durante la aplicación y el tiempo de secado son cruciales para la durabilidad de la misma. Tradicionalmente, el conocimiento sobre la cal se transmitía de generación en generación y la gente solía usarla continuamente. Hoy en día son pocos los artesanos expertos en la materia.

Lo que se intentará con este apartado será enfocar de forma técnica lo que es este tipo de práctica constructiva. Se tratará de especificar mezclas exactas de cal y arena mientras que lo que suele suceder en el lugar de la obra es que la mezcla se haga de forma aproximada. De todos modos, la cantidad de obras realizadas con mortero de cal demuestran que esta sigue siendo una forma de trabajo efectiva. Es muy interesante conocer qué sucede en el proceso de calcinación, la hidratación o el proceso de mezcla para poder trabajar correctamente con el material.

¹ CONFER - Barbara Jones, op. cit.





CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Como introducción, y para aclarar una serie de conceptos, diremos que el mortero es una argamasa formada por aglomerante, arena y agua, que se emplea para unir piedras, ladrillos o incluso balas de paja. También se puede utilizar para ejecutar un enfoscado (capas de mortero que se aplican a un muro para protegerlo de las inclemencias del tiempo y como soporte del revoco o del estuco) o para ejecutar un estuco (superficie exterior de protección formada por cal en pasta, arena de mármol, agua y en ocasiones tierras de color). El estuco, además de proteger el soporte, mejora su apariencia exterior¹.

La característica más importante del mortero de cal es que una vez puesto en obra va endureciéndose o carbonatando poco a poco hasta convertirse en una piedra cada vez más resistente.

Si el proceso de apagado se realiza correctamente, la cal no variará de volumen al endurecerse por carbonatación. La perfecta estanqueidad de las juntas, la ausencia de retracción y la cualidad de endurecerse con el tiempo, convierten al mortero de cal en un excelente aislante térmico y acústico que impide la penetración de agua, es incombustible y en caso de incendio no genera humo.

En cuanto a los acabados, las posibilidades son infinitas. Al ser un material muy maleable, antes de que endurezca puede ser trabajado con todo tipo de herramientas, consiguiendo la apariencia de sillares abujardados, almohadillados, pulidos,... y admite una amplia gama de colores e incluso la figuración, a fin de imitar un simple aparejo de ladrillo, de relucientes mármoles o acoger la pincelada suelta de los grandes fresquistas².

El ciclo de la cal

El ciclo de la cal, por tanto, se inicia con la calcinación, descarbonatación o cocción a unos 900°C de la piedra caliza. Durante este proceso, el carbonato cálcico (CaCO_3) presente en la piedra se transforma en óxido de calcio o cal viva (CaO) al disociarse del dióxido de carbono que va a la atmósfera. El aspecto de la cal viva es de fragmentos irregulares o terrones, aunque muchos fabricantes ofrecen la cal ya triturada incluso en finuras muy altas.

Es necesario hidratar o apagar la cal viva para su empleo en construcción. El agua hincha los terrones y los transforma en una pasta blanca o polvo blanco seco, según la cantidad de agua que se haya aportado.

El proceso químico es el siguiente: aportando agua al óxido de calcio o cal viva, se consigue hidróxido de calcio o cal apagada (Ca(OH)_2).

El mortero de cal confeccionado en húmedo se obtiene añadiendo a la pasta blanca, arenas, agua y, si se desea, pigmentos.

En el proceso de recarbonatación de la cal, el hidróxido de calcio o cal hidratada, al entrar en contacto con el gas carbónico del aire, se transforma en carbonato de calcio (CaCO_3), es decir, retorna a ser la piedra con la que se iniciaba el ciclo³.

¹ Francisco Azconegui Morán et. al. Guía práctica de la cal y el estuco. 1ª edición. León, 1998. Editorial de los oficios. ISBN: 84-930427-0-6

² CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

³ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.



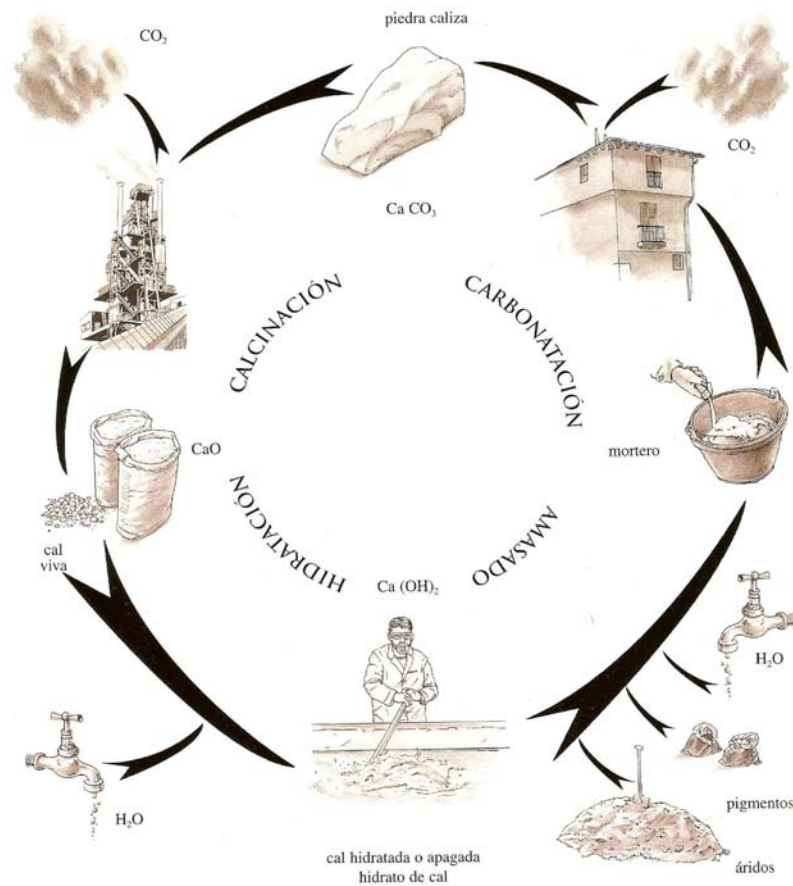


Fig. 12.58- El ciclo de la cal. [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

Tipos de cales

Aunque en el lenguaje coloquial se usa la palabra cal como denominación genérica, existen varios tipos de cales diferenciándose en su composición química, propiedades y aplicaciones. Una primera clasificación puede establecerse en cales aéreas o cales hidráulicas, según endurezcan solamente mediante carbonatación expuestas al aire o endurezcan bajo el agua.

Cales aéreas

Estas cales se obtienen mediante calcinación de rocas calizas o dolomías puras que no contengan más de un 5% de materiales arcillosos. Cuando son muy puras en carbonatos (superior al 95%), por la untuosidad que dan a las pastas producidas mediante su mezcla con agua, han recibido también en tiempos pasados el nombre de “cales grasas”. Cuando la pureza en carbonatos es menor y el contenido en arcillas llega hasta el 5%, las cales aéreas producidas se han denominado “cales magras” por su menor untuosidad en las pastas producidas¹.

¹ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Como se ha mencionado anteriormente, las cales aéreas pueden presentarse en dos estados: cales vivas (óxido de calcio) y cales hidratadas (hidróxido de calcio), también llamadas hidratos de cal.

Cales hidráulicas

Cuando la piedra calcinada contiene mezclas de margas y arcillas ricas en sílice, aluminio e hierro, se producen las cales denominadas hidráulicas, porque endurecen tanto en contacto con el aire como en el agua. En España no hay producción de este tipo de cales, a pesar de que su uso está ampliamente extendido en Italia, Francia, Alemania o Estados Unidos.

Los romanos ya comprobaron que añadiendo el polvo de una roca volcánica a la cal aérea, la mezcla endurecía bajo el agua. Esta roca, denominada “puzolana” por ser extraída de Puzzuoli, estaba compuesta por una cantidad indeterminada de sílice, alúmina y óxido de hierro, que son los elementos que le dan a la cal la característica de poder endurecer en un medio acuoso¹.

CLASIFICACIÓN DE LAS CALES PARA CONSTRUCCIÓN ²		
1. Cal de alto contenido en calcio	90	CL 90
2. Cal de alto contenido en calcio	80	CL 80
3. Cal de alto contenido en calcio	70	CL 70
4. Dolomía calcinada	85	DL 85
5. Dolomía calcinada	80	DL 80
6. Cal hidráulica	2	HL 2
7. Cal hidráulica	3,5	HL 3,5
8. Cal hidráulica	5	HL 5

Tabla 12.1

En esta tabla se clasifica los diferentes tipos de cales y dolomías según su contenido en óxidos de calcio y magnesio. En el caso de las cales hidráulicas lo hace según su resistencia a los 28 días con valores expresados en Nw/mm².

Existe otra clasificación según la norma UNE – ENV 459-1 que establece los requisitos químicos que deben cumplir los distintos tipos de cales para que puedan ser comercializados en la Unión Europea.

Proceso industrial de fabricación de la cal

En los hornos industriales actuales se pueden controlar los parámetros del proceso de fabricación de la cal para producirla con una alta y homogénea calidad. El proceso se inicia con la elección de un material de buena calidad con alto contenido de carbonatos cálcicos y magnésicos (superior al 95%). Los fragmentos de

¹ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

² UNE 80-501 / 3



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

roca, una vez transportados a las instalaciones son sometidos a diversos procesos de triturado y cribado, hasta obtener el tamaño adecuado para la calcinación de la piedra¹.

Al tratar la piedra caliza a altas temperaturas, se desprende en primer lugar el agua que pueda contener y al alcanzar los 900°C comienza a descarbonatarse, produciendo cal viva. Los hornos más utilizados son los “hornos verticales”, que consisten en cilindros de acero revestidos en su interior con ladrillos refractarios.

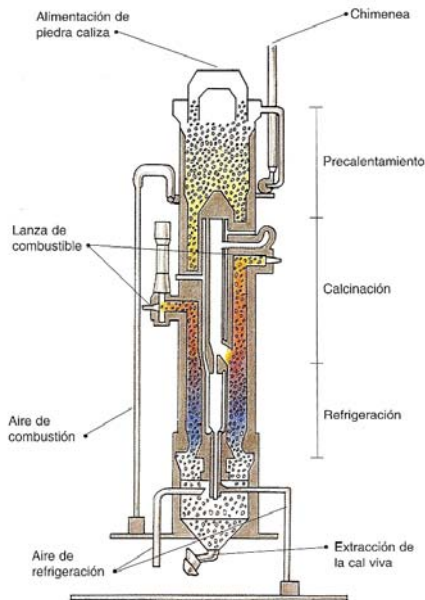


Fig. 12.59- Esquema de un horno vertical [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

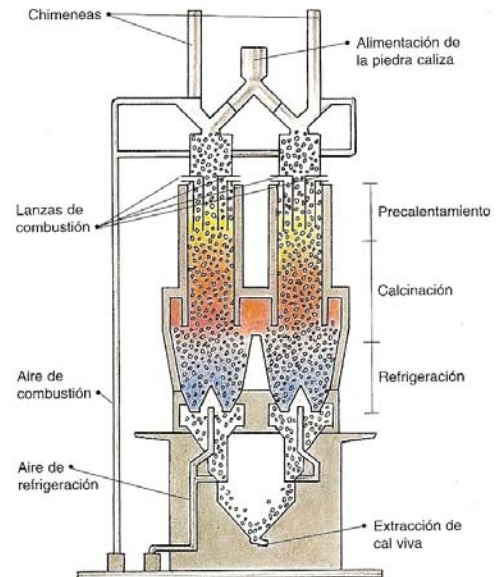


Fig. 12.60- Interior de los hornos de corrientes paralelas [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

Con las mismas pautas de funcionamiento, pero con una mayor producción y ahorro energético, se comportan los llamados “hornos de corrientes paralelas”. Este tipo de horno consiste en dos cubas verticales que trabajan alternativamente.

Los hornos rotativos constan de un cilindro de acero de hasta 100 metros de longitud y hasta 5 metros de diámetro, con un interior también revestido con ladrillos refractarios. Éstos tienen un consumo superior pero a la vez una producción muy superior además de poder aprovechar granulometrías con tamaños más finos.

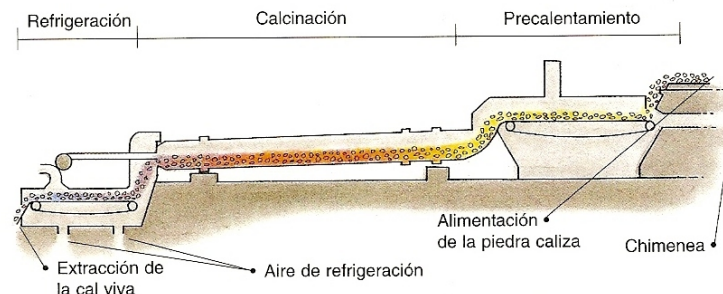


Fig. 12.61- Esquema de un horno rotativo [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

¹ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

Hidratación de la cal

El producto industrial más demandado por la construcción es el hidrato de cal, que se obtiene añadiendo cierta cantidad de agua al óxido de calcio. El agua al contacto con la cal viva provoca una reacción fuertemente exotérmica. Las partículas de cal viva se transforman entonces en cal hidratada en polvo o en forma de pasta, dependiendo de la cantidad de agua aportada. Debido a que parte del agua aportada se evapora y otra cantidad queda como “agua libre” no combinada químicamente, la cantidad mínima de agua necesaria en el proceso de obtención de hidróxido de calcio en polvo seco será, al menos, del 50% del peso de la cal viva.

En los procesos industriales de hidratación mecánica se alimenta el hidratador con cal viva, pasando ésta por un dosificador de peso constante. Unos pulverizadores situados en la zona superior del hidratador aportan la cantidad de agua necesaria para hidratar los óxidos de calcio. El calor desprendido durante la reacción permite que la cal salga en forma de polvo seco. Al almacenar y servir el hidrato de cal se deben tomar precauciones para evitar la carbonatación que se produce al entrar en contacto con el gas carbónico del aire¹.

Proceso artesanal de fabricación de la cal

Los hornos antiguos aparecen siempre adosados a un declive natural que les sirve de abrigo y facilita la labor de carga y descarga desde la boca superior. También es importante situarlos cercanos a los lugares de aprovisionamiento de materiales, tanto de piedra como de combustible. Brezos, romeros, zarzales e incluso piñas proporcionan una buena llama para la cocción.



Fig. 12.62- Desbroce de la ladera para un horno excavado [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]



Fig. 12.63- Apertura de la boca de un horno [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

¹ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Las paredes interiores deben recubrirse de arcilla o construirse en ladrillo o piedra refractaria para conservar y aislar térmicamente el horno.

La carga del horno es el trabajo más duro y de éste depende buena parte del éxito de la cocción. Por la boca inferior se introduce una persona que va construyendo una falsa bóveda con fragmentos de caliza de dos a tres kilogramos, dejando una abertura circular por el centro por la que subirá la llama. Se puede utilizar una cimbra de madera que servirá de combustible para la cocción, pero también se pueden ir colocando de forma que se sustenten por su propio peso. Esto se consigue colocando las piedras más grandes hacia el centro y solapando unas con otras con un buen asiento. Las más pequeñas sirven de relleno hacia las paredes del horno¹.

Una vez que está la falsa bóveda está terminada se inicia el fuego que se mantendrá de manera ininterrumpida durante 3 días. En este tiempo el humo va cambiando de color desde un negro espeso hasta un blanco al final del proceso.

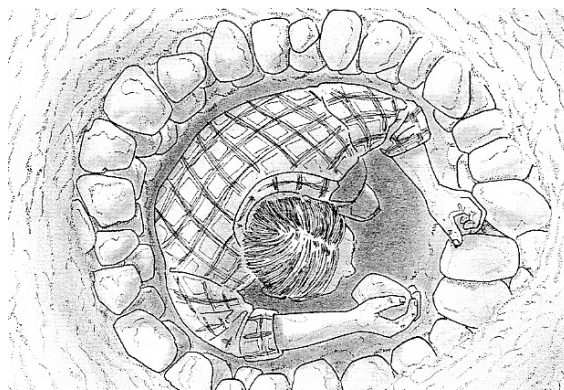


Fig. 12.64- Colocación de las primeras piedras calizas [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

Hidratación o apagado de la cal

Como se comentó anteriormente, el producto obtenido tras el apagado de la cal varía en función de la cantidad de agua incorporada. Aunque la hidratación de los óxidos, lógicamente, dará como resultado hidróxidos de calcio, éstos pueden adoptar diferentes estructuras según la cantidad de agua presente en la reacción. Así, si se incorpora sólo la mitad del peso de la cal viva en agua, se obtiene hidrato en polvo. Aportando una cantidad de agua tres o cuatro veces el peso de la cal viva, se consigue pasta de cal y con una cantidad mayor, el resultado será la lechada de cal.

Este proceso se puede hacer en bidones y para ello se necesita mucha limpieza de las herramientas y protegerse con mascarillas, botas, gafas y guantes para evitar irritaciones en los ojos y en la piel. Se vierte primero el agua y luego la cal en una proporción de 1 kg de cal viva por cada 3,6 litros de agua².

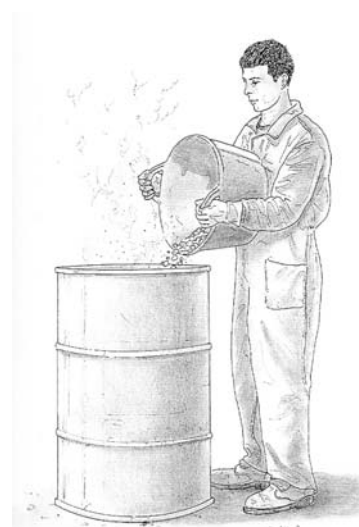


Fig. 12.65- Vertido de los terrones de cal viva en un bidón limpio y con agua [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

¹ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

² CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

La cal apagada se tamiza y se deja reposar cubierta de líquido en recipientes herméticos.



Fig. 12.66- Detalle del tamizado
[Francisco Azconegui Morán et. al., op.

Los enfoscados

Un mortero expuesto al aire y fabricado con cal de calidad, perfectamente apagada, no se deteriora con el tiempo, sino que va adquiriendo una mayor consolidación. A las 24 horas de aplicado el mortero de cal se consigue el primer endurecimiento desde la superficie hacia el interior, que puede alcanzar un milímetro de espesor, debido a la evaporación del agua de la masa. La carbonatación total del revoco no se logra hasta pasados varios meses. Gracias a la lentitud del proceso de carbonatación, la cal es un material inmejorable para absorber los movimientos de las fábricas. Este endurecimiento lento y progresivo hace que el mortero sofra retracciones. Además, las pequeñas fisuras superficiales se cierran con la carbonatación¹.

Por otro lado, no hay duda de que el mortero mixto se está imponiendo con fuerza en la industria de la construcción. Su éxito se debe a que con la dosificación adecuada de los dos componentes esenciales se consiguen reunir las ventajas del cemento, alta resistencia mecánica y fraguado rápido, y las de la cal, plasticidad y gran capacidad de retención de agua.

En los morteros mixtos el endurecimiento se produce por la combinación del hidróxido de calcio con el anhídrido carbónico y, además, al contener cemento, por el proceso de hidratación de éste con el agua, que acelera el endurecimiento, le da cualidades hidráulicas y resistencia mecánica a corto plazo.

Uno de los motivos de la incorporación de la cal en los morteros de cemento fue, precisamente, dotar de mayor plasticidad y trabajabilidad a las masas. La cal, por su finura, dota de gran consistencia y plasticidad a los morteros, ya que consigue bañar con una fina película la superficie entre los áridos, evitando su rozamiento. Además, el lento proceso de endurecimiento de la cal favorece su puesta en obra, permitiendo incluso las correcciones del trabajo.

Los morteros con cal y mixtos poseen otras características importantes:

Retención de agua. Para conseguir un mortero plástico y adherente, es importante que la masa no pierda excesiva agua, bien por absorción del muro o por una rápida evaporación. Si el secado es demasiado rápido, la retracción de la masa puede producir cuarteos. Numerosos estudios han verificado, a través de aparatos específicos de filtración, que los morteros que llevan cal son los que poseen mayor capacidad de retención de agua.

Impermeabilidad. La perfecta adherencia al soporte y la ausencia de tensiones importantes en el endurecimiento de estos morteros, permite que en las paredes revocadas con ellos no se presenten las típicas

¹ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

grietas, cuarteos o canales por los que pueda filtrarse el agua. Por otra parte, el sistema de microporos de los morteros con cal permite el paso del vapor de agua, contribuyendo a la eliminación de las humedades.

Adherencia. Es el valor más importante para un mortero, debido a que las argamasas se emplean para unir elementos entre sí, por ejemplo los ladrillos de un muro, o bien para crear una capa que, adherida al paramento, lo proteja y decore. La adherencia de un mortero depende en gran medida de la plasticidad de la masa y de su capacidad para retener el agua.

De todos modos, el más recomendable para las paredes de balas de paja cuando son paredes autoportantes es el de cal, que tiene mucha más elasticidad.

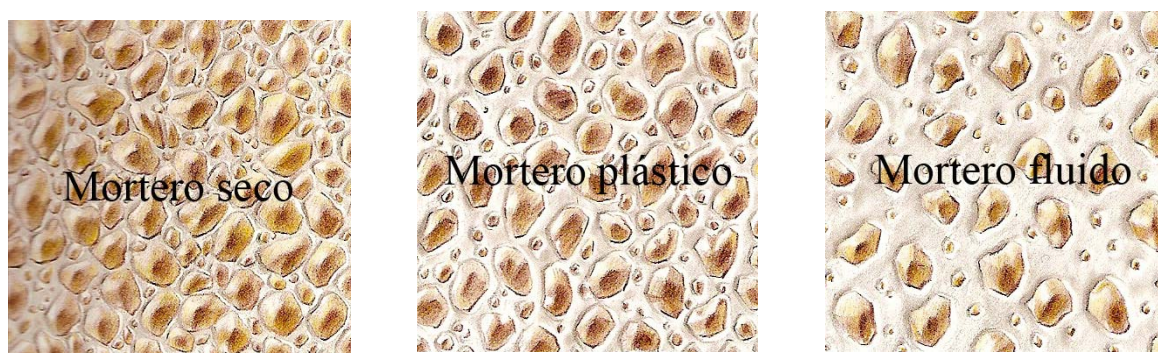


Fig. 12.67- Distintas consistencias de mortero de cal [Francisco Azconegui Morán et. al., op.

Agua y arena

Para que un mortero conserve su plasticidad y cierta fluidez es necesario incorporar agua a la mezcla, aunque nunca en exceso, ya que su evaporación podría provocar serias retracciones e impedir la carbonatación del mortero. Cualquier agua es adecuada para el amasado, con tal de que no contenga materias que alteren las propiedades del mortero. En este sentido son aptas todas las aguas clasificadas como potables.

Los áridos forman el esqueleto del mortero, dotan de cohesión y solidez a la argamasa y actúan como estabilizadores de volumen, al oponerse a las contracciones de la cal. Además, favorecen la carbonatación, al aumentar la porosidad de la mezcla, permitiendo que el aire, y por tanto el anhídrido carbónico, pueda acceder al interior de la masa. Por último, hacen que el mortero resulte más económico, ya que reducen a la mitad o a un tercio la cantidad de cal amasada.

De todo ello, se deduce que la elección de una buena arena es fundamental para elaborar un mortero de calidad. Según parece, los mejores áridos son los que provienen de rocas cuarzosas o silíceas, calizas disgregadas y, en menor medida, de las graníticas.

Las arenas silíceas no absorben agua, son duras y con el paso del tiempo, según su mayor o menor grado de cristalización, pueden reaccionar con los hidróxidos de calcio dando lugar a silicatos cálcicos, que aumentan la solidez y resistencia del mortero. Deben evitarse las arenas arcillosas, que sí absorben agua del mortero, dificultan la cohesión y aumentan la retracción. Por la misma razón, las arenas han de estar limpias y libres de impurezas como barro, arcilla, limos, escorias y materias orgánicas.



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

En cuanto a la forma, son preferibles los granos poliédricos, ya que son más adherentes que los redondeados por tener una superficie de contacto mayor. Los áridos redondeados, al oponer menor resistencia a la gravedad, dan lugar a morteros de consistencia menos plástica y más fluida.

El volumen de huecos del mortero para enfoscados ha de permitir una buena aireación del interior de la masa, pero para que ésta sea compacta no debe exceder del 35%. Para ello, lo práctico es realizar un árido de granulometría mixta, de forma que los granos más finos rellenen el espacio entre los más gruesos.

Dosificación de los morteros para enfoscados fratasados

Los morteros tradicionales de cal se elaboran con una proporción de un volumen de cal por dos o tres de arena, e incluso hay morteros que pueden contener hasta cuatro veces la cantidad de arena.

Para obtener dosificaciones exactas, las proporciones de los diferentes materiales han de expresarse en peso, en obras pequeñas los operarios recurren a unidades de medida de volumen, como paladas o cubos.

De todas formas, es difícil establecer una dosificación genérica para morteros ya que es necesario tener en cuenta muchos factores.

Una cal mal apagada, con una proporción grande de cal libre puede provocar desconchados en los acabados. Esta cal reaccionaría a la hora de mezclarla con el agua de amasado, por lo que es necesario sumergirla un par de días en agua.

La dosificación adecuada también depende de árido empleado. Si la arena es de tamaño fino contribuye a la plasticidad por lo que no será necesaria una cantidad excesiva de cal. Por el contrario, si la arena tiene un tamaño grande habrá que aumentar la proporción del hidrato.

Como conclusión de lo anterior se deduce que es aconsejable hacer pruebas de dosificación antes de iniciar la obra. En la obra se puede hacer esta prueba sobre una rasilla y dejarla 24 horas para comprobar su resultado. Si transcurrido este tiempo la masa se desmorona es porque era una mezcla pobre en cal hidratada. Si por el contrario está muy cuarteada es necesario reducir la proporción de aglomerante. De todos modos, la experiencia aconseja no realizar mezclas con exceso de cal para que no se produzcan fisuras por retracción¹.

La dosificación también varía en las distintas capas de mortero que se aplican en el muro. Las primeras suelen tener mayor cantidad de áridos, siendo las posteriores más ricas en cal hidratada.

Todo lo anterior hace referencia a los morteros elaborados únicamente con cal, arena y agua. Para los **mixtos**, las dosificaciones más empleadas son de un volumen de cemento, un volumen de cal y seis de arena (1:1:6) o bien un volumen de cemento, dos de cal y nueve de arena (1:2:9). También aquí las proporciones varían según la arena, la temperatura, el tipo de soporte...²

Los morteros mixtos poseen resistencia mecánica a corto plazo y endurecen más rápidamente que las argamasas compuestas únicamente de cal. La cal contribuye a mejorar las cualidades del mortero aportando plasticidad, trabajabilidad, mayor retención de agua, mejor adherencia y menores retracciones y figuraciones. De todos modos, para cada tipo de obra se debe estudiar la composición del mortero más adecuada.

¹ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

² CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

TIPO DE MORTERO	
DE CAL	MIXTO
—	1 : 1 : 6
—	1 : 2 : 9
1 : 4	—
1 : 3	—
1 : 2	—

↑ AUMENTO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA
 ← AUMENTO DE LA RESISTENCIA AL HIELO
 → AUMENTO DE LA RETENCIÓN DE AGUA, ADHERENCIA Y PLASTICIDAD

Tabla 12.2

Ejecución del enfoscado**Observaciones:**

- No es recomendable aplicar todo el grosor del enfoscado de una sola vez. La superposición de capas de mortero aplicadas mientras la anterior se mantiene aún húmeda asegura la adherencia de la argamasa al soporte y facilita la carbonatación del enfoscado.
- La dureza y resistencia de las capas han de ir decreciendo del interior a la superficie. Las primeras capas deben tener una cantidad mayor de áridos e incorporar en las capas finales un volumen de áridos menor.
- Se evitarán las masas con excesivo aglomerante ya que éstas sufren altas retracciones.
- En los enfoscados mixtos realizados con cemento blanco, las eflorescencias quedan ocultas por el color del mortero.

Como se ha dicho antes, el enfoscado de un muro se debe hacer en varias capas de mortero para conseguir la plenitud y la protección del paramento, y servir de soporte de pinturas o estucos. Este trabajo ha sido drásticamente reducido a una única capa de revestimiento, a pesar de que una buena obra de construcción no debería pasar por alto las ventajas del método tradicional. El grosor final de un enfoscado puede alcanzar entre 1,5 y 5 centímetros, y sólo tendiendo y presionando las sucesivas capas delgadas de material se logra la adherencia de la pasta al muro y se evitan las retracciones.

Hoy en día, el amasado se hace con la mezcladora mecánica (hormigonera) y se vierten los materiales en este orden: agua, arena y cal en las proporciones establecidas. En el caso de morteros mixtos se deben mezclar primero la cal y el cemento y algo de agua, y después incorporar la arena y el resto de agua.

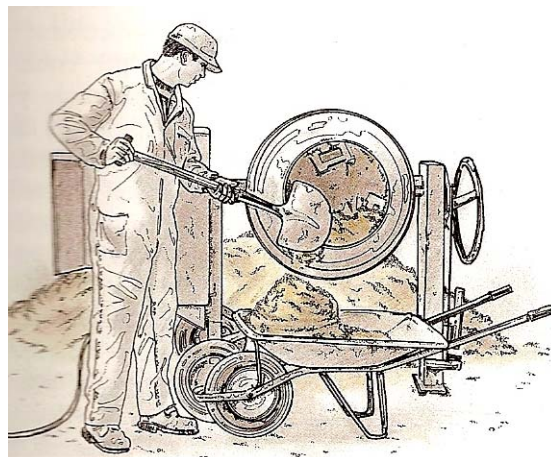


Fig. 12.68- Mortero de cal amasado en la mezcladora mecánica [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

A la hora de ejecutar el enfoscado, éste se puede hacer sin maestrear (a buena vista) o maestreado. Cuando se trata de paredes de balas de paja se suele hacer de la primera forma aunque cualquiera de ellas es válida.



Fig. 12.69- Preparativos para el enfoscado interior [Nathaniel Corum, op.].

En el caso de que la pared cuente con una malla metálica en las superficies, la aplicación del enfoscado ya es necesario hacerla con una herramienta manual tal como una llana. La malla estará en contacto con la superficie de las balas y la primera capa de mortero tendrá que recubrir esta malla. Para ello es necesario hacerlo con energía de modo que la mayor cantidad de mortero penetre por la estructura porosa de las balas, y así garantizar una buena adherencia.

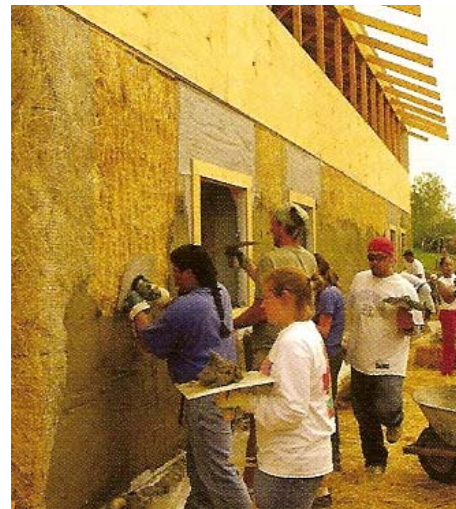


Fig. 12.70- Aplicación con llana de un enfoscado [Nathaniel Corum, op. cit.]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

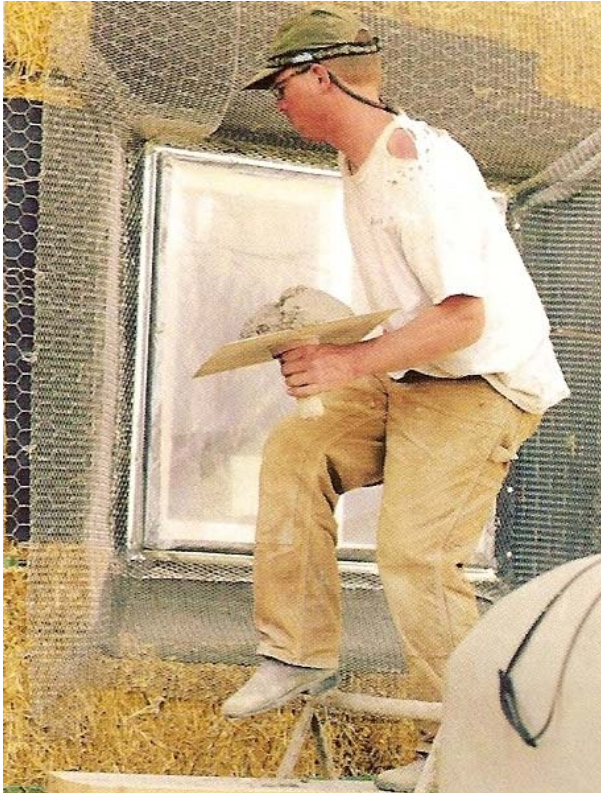


Fig. 12.71- Persona enfoscando una pared [Nathaniel Corum, op. cit.]

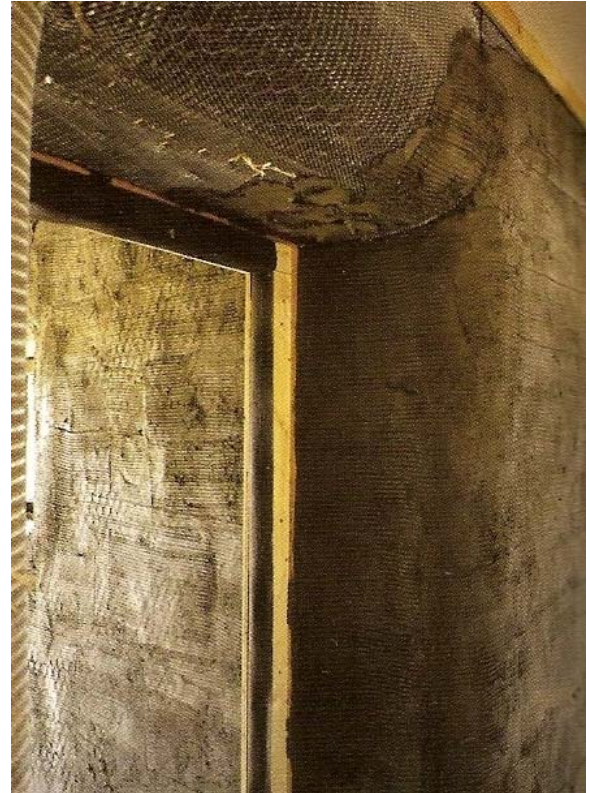


Fig. 12.72- Enfoscado de pared en proceso [Nathaniel Corum, op. cit.]



Fig. 12.73- Enfoscado de las paredes interiores en proceso [Nathaniel Corum, op. cit.]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Si la pared no cuenta con este tipo de malla metálica, la primera capa es incluso recomendable aplicarla de forma manual. Este proceso se debe hacer con algún tipo de guante resistente porque consiste en ejercer presión con la mano sobre la pared para que el mortero penetre bien por todas las juntas e incluso por los poros de las balas. Esta primera capa de material quedará con una superficie muy irregular pero esto no importa porque se podrá corregir en las posteriores. Lo que en realidad es importante es que el mortero tenga una buena adherencia con la paja.

Una de las zonas más difíciles de aplicar el enfoscado es en los cabeceros de las ventanas o de las puertas. En estas zonas es necesario efectuarlas con mucho cuidado.



Fig. 12.74- Enfoscado del cabecero de una ventana [Nathaniel Corum, op. cit.]

Lo normal es que el enfoscado se aplique en dos o tres capas. Si es en tres, la última es un par de milímetros de espesor para dar el acabado final. De todos modos, la primera capa de mortero es deseable que no sea muy lisa de cara a que la siguiente capa tenga facilidad para agarrarse a la primera. Sobre todo en el caso de la aplicación de la primera capa con llana, en el caso de aplicación con la mano también se puede si se considera oportuno, se puede pasar la llana con la arista ranurada por la superficie de forma que queden unos surcos en horizontal como se ve en la siguiente imagen.



Fig. 12.75- Raspado superficial [Nathaniel Corum, op. cit.]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Una vez que se haya aplicado esta primera capa de material, tanto en el caso que tiene malla metálica como en el que no la tiene, y si así estaba previsto, se puede proceder a maestrear el paramento para aplicar la segunda capa. Esta segunda debe ser realizada dentro de las 24 horas siguientes y tan pronto como la primera tenga resistencia suficiente. Antes de proceder, y si se observa que el enfoscado no tiene cierta humedad, se debe humedecer ligeramente. En realidad ambas capas endurecen al mismo tiempo y se comportan como una sola capa.

Después de aplicar la segunda capa de mortero se debe mantener la superficie húmeda durante al menos dos días. En ambientes cálidos y secos se debe humedecer la superficie una vez por la mañana y otra por la tarde. Esto le proporcionará a las paredes la humedad que necesitan para tener un curado adecuado.

Lo ideal es que la capa de acabado no se aplique hasta varios meses después de que se haya endurecido la segunda capa. De todos modos, si es necesario se puede aplicar una semana después.

El maestreado consiste en ir nivelando y aplomando el paramento. Su espesor puede llegar a alcanzar el centímetro y medio y se inicia colocando estratégicamente unos tientos con el grosor de la capa a aplicar y que sirven de guías para ejecutar las maestras.

Los tientos pueden realizarse con el propio mortero o fijando piezas cerámicas que más tarde deberán ser eliminadas y el hueco relleno de mortero. Generalmente se coloca el primer tiento en el extremo superior de la pared y, con la plomada, se alinea otro en la orilla inferior. A intervalos regulares, se van situando los sucesivos registros hasta cubrir todo el paramento.



Fig. 12.76- Colocación de tiento inferior [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

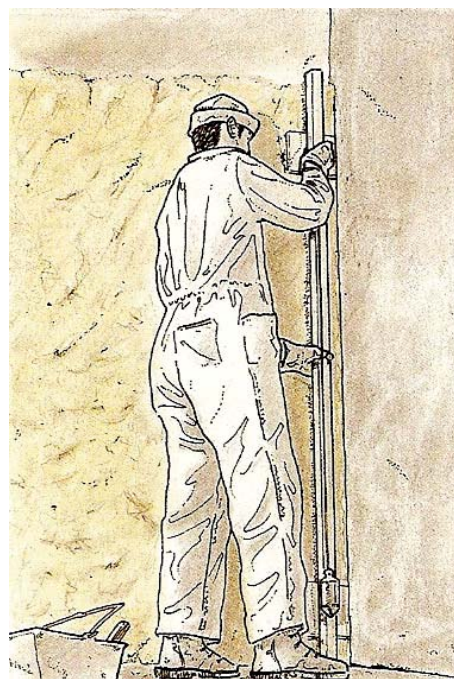


Fig. 12.77- Comprobación de la plomada [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

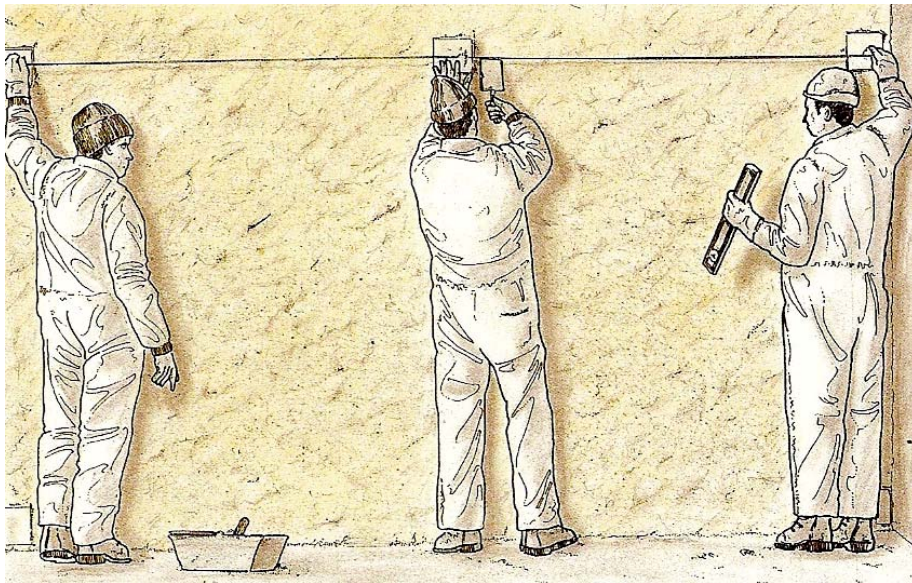


Fig. 12.78- Distribución de los tientos en el paramento [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

Las maestras son unas tiras de mortero, perfectamente en línea recta sobre la superficie de la pared, y sirven de registro para correr el reglón o regla que extiende y quitar el material sobrante que se tira contra la pared. La ejecución de las maestras requiere cierta destreza, ya que hay que cargar material ayudado sólo con la paleta y evitar que se desplome toda la cinta de argamasa. Una vez ejecutada se comprueba su rectitud con plomada y regla.

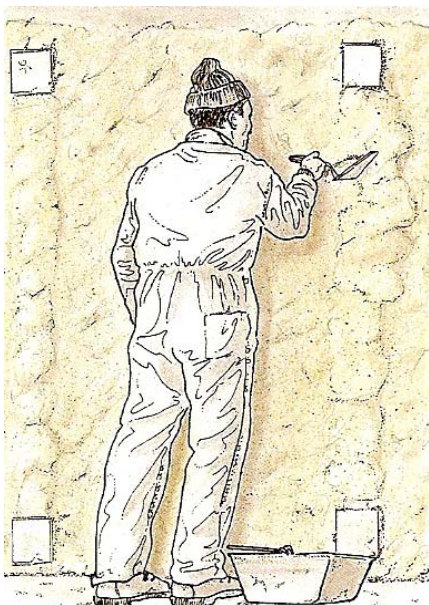


Fig. 12.79- Ejecución de la maestra [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

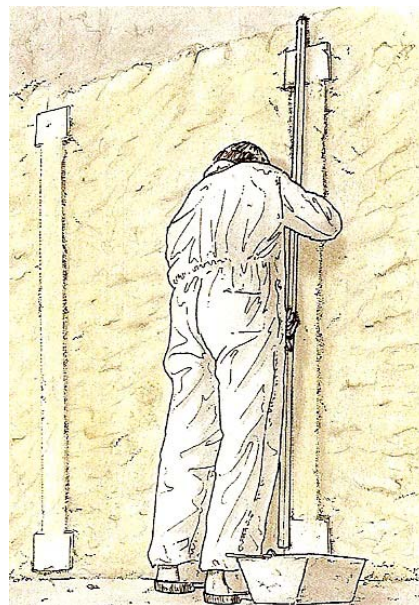


Fig. 12.80- Comprobación de la rectitud de la maestra [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

A continuación se procede a rellenar de mortero la superficie comprendida entre dos maestras, denominada “cajón”. Si el grueso del enfoscado fuera muy importante, el paletado debería hacerse en dos o tres jornadas, para favorecer el oreo de cada una de las capas que han de ser de poco espesor para evitar que se desplomen por su propio peso y para facilitar la carbonatación. Para eliminar el material sobrante de los cajones, se apoya una regla de madera o metálica sobre dos maestras y se recorre vertical, horizontal y oblicuamente toda la superficie¹.



Fig. 12.81- Nivelación del enfoscado [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

Cuando el grosor del mortero del cajón está próximo a alcanzar el espesor de las maestras se debe extender la masa en el muro y con el fratás se comprime el material hasta que el muro quede perfectamente enrasado.



Fig. 12.82- Fratasado del paramento [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

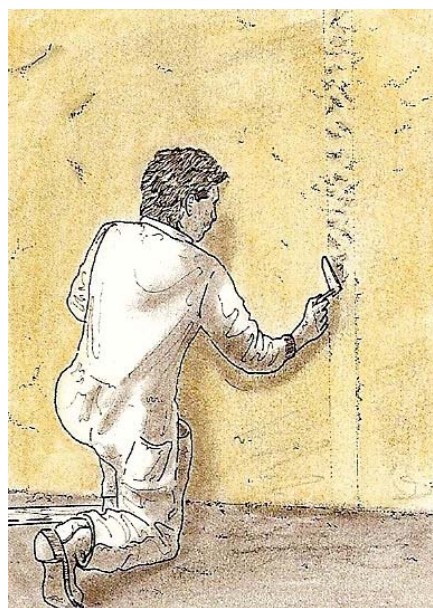


Fig. 12.83- Picado de las maestras [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

Antes del último fratasado, hay que tomar la precaución de picar las maestras y rellenar el espacio vacío con nueva masa, para evitar que aparezcan fisuras en el muro debido a la diferencia de secado del mortero de las maestras, que han sido ejecutadas antes que el resto del muro.

¹ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

El acabado final se realiza describiendo círculos con el fratás y salpicando el muro con agua. El fratás deja la superficie con cierta rugosidad, necesaria para que las capas posteriores de estuco (si es que se aplican) puedan adherirse al enfoscado. El paramento debe permanecer húmedo para evitar las grietas provocadas por una retracción apresurada, por ello se ha de salpicar con agua la superficie¹.

Si el acabado final es el propio enfoscado con una capa de pintura, la textura del fratasado debe ser más fina y cuidada, lo que se consigue utilizando áridos de una granulometría menor y empleando un fratás de PVC en lugar de uno de madera.

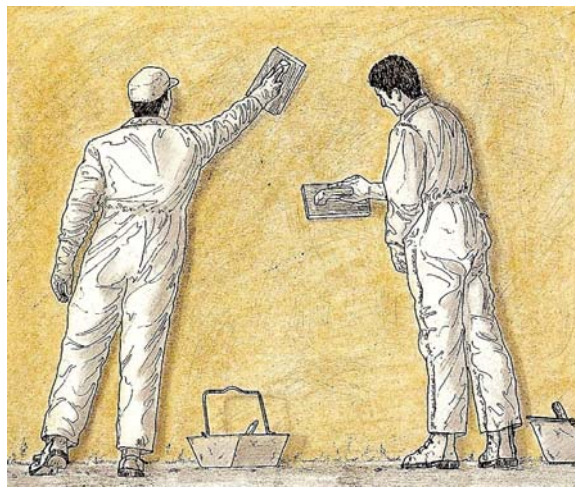


Fig. 12.84- Fratasado final del paramento [Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.]

12.6.2.3 Mortero de arcilla

Aunque este tipo de recubrimiento es muy conocido en países del Este, Estados Unidos o África, no lo es tanto en Europa. A pesar de esto, aún existen construcciones de 100 años o más en las que los muros eran hechos a base de piedras que se asentaban con barro, y aún están en perfecto estado.

El barro se aplica a la paja de la misma forma que se puede aplicar la cal. La primera capa se debe aplicar con la mano y debe ser fina y rica en arcilla. Esto es para que se produzca una buena unión entre estos dos materiales. Las siguientes capas pueden tener una cantidad importante de paja picada lo cual disminuye el riesgo de fisuración del recubrimiento. La capa de acabado debe tener arena fina para que el acabado sea suave².

A menudo, estas capas de barro se aplican antes de las de cal para eliminar las ondulaciones y para reducir la cantidad de éste último a aplicar. Se suele utilizar como acabado en interiores, pero rara vez en exteriores a no ser que sea en zonas muy protegidas. En el exterior requiere la aplicación de alguna capa protectora ya que se trata de un material que no soporta bien la humedad.

En el mercado alemán existe a la venta este producto en forma de polvo preparado para no tener que hacer nada más que mezclarlo con agua. Se vende en forma de polvo en unos sacos y existen diferentes calidades según sea para capas soporte o para terminación³.

Una de las mayores ventajas de su utilización es que permite la libre expresión creativa. Este tipo de material puede ser moldeado para crear relieves en las paredes. De este modo se pueden personalizar las construcciones como se puede ver en las siguientes imágenes.

¹ CONFER – Francisco Azconegui Morán et. al., op. cit.

² CONFER – Bárbara Jones, op. cit.

³ CONFER – Bárbara Jones, op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO



Fig. 12.85- Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.



Fig. 12.86- Interior del Strawbale Studio

El barro y las fibras naturales tienen una gran afinidad y se preservan el uno al otro. Las fibras naturales, como puede ser la paja, en combinación con el barro aumentan su resistencia a tracción y colaboran para controlar la contracción y el agrietamiento.

En contraposición, las fibras naturales se descomponen cuando entran en contacto con sustancias altamente alcalinas, especialmente en climas tropicales. Por esta razón, las fibras naturales no se utilizan como refuerzo del cemento sin aditivos que neutralicen los efectos de la alcalinidad¹.

Es esencial aplicar la argamasa de tierra arrastrándola por la superficie de la pared en un movimiento horizontal, lo que fuerza la paja a una alineación horizontal. Esto es importante porque, cuando la lluvia azota la paja situada en horizontal, el agua se partirá y se deslizará por la pared en vez de correr en riachuelos y erosionarla, como sucedería si la paja estuviera alineada en vertical².

De todos modos, en paramentos expuestos a la lluvia es necesario aplicar un mortero de cal para protegerlos de este fenómeno.



Fig. 12.87- Pared exterior con enfoscado de barro y acabado superficial con mortero de cal [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

¹ CONFER – Bárbara Jones, op. cit.

² CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

12.6.2.4 Morteros de cemento

Existen construcciones en Canadá y Estados Unidos que utilizan este tipo de mortero como enfoscado y no muestran ningún signo de deterioración. Por otro lado, sí existen construcciones que, a causa de tener enfoscados con mortero de cemento, tienen problemas de putrefacción. El mortero de cemento es un material muy resistente y también muy rígido. Estas cualidades propician la aparición de grietas y fisuras ante cualquier movimiento estructural (movimientos que sufren todas las construcciones). Otra propiedad de este enfoscado es su alta impermeabilidad al agua y al vapor de agua. La unión de estas dos propiedades, rigidez e impermeabilidad, es la causa de grandes problemas de putrefacción que suceden en las paredes hechas con balas de paja. Aunque la pared tiene una elevada impermeabilidad al agua, ésta puede penetrar a través de las fisuras superficiales o por capilaridad. Una vez que el agua está en el interior de la pared no encuentra facilidades para salir, por lo que se acumula en las partes bajas de las paredes.

12.6.3 Trasdoso al interior con placas de cartón yeso

Trasdoso por el interior los cerramientos de balas de paja puede ser una opción a considerar, aunque los especialistas no lo aconsejan por la pérdida de resistencia estructural y ante el fuego. Lo primero que hay que tener en cuenta es que se prescinde del recubrimiento interior, y con esto todas las prestaciones que éste le confería a la pared.

En primer lugar, el recubrimiento actuaba como una barrera de aire, limitando la cantidad de aire en la pared al que pudieran tener las balas en su interior, que es muy poco. Esto es importante tenerlo en cuenta por el crecimiento de microorganismos en la paja. En ausencia de oxígeno (con recubrimiento) su crecimiento se ve dificultado. Con el trasdosado estamos dejando una gran cantidad de oxígeno en la pared, oxígeno que puede facilitar el crecimiento de los microorganismos que puedan estar en la pared en un momento determinado.

En segundo lugar, el recubrimiento, junto con el refuerzo de malla metálica, ofrecían una gran resistencia a los esfuerzos de viento. El borrador del futuro *California Straw Bale Code 2007* establece que la máxima relación altura espesor para paredes con recubrimientos sin refuerzo o sin recubrimientos es de 4/1, que es un dato bajo. Habría que diseñar elementos horizontales de rigidización del muro. Una opción que permite elevar el dato de la esbeltez máxima a 6/1 es la colocación de elementos longitudinales de conexión interna. La normativa permite que estos sean de madera, acero o bambú, que tengan un diámetro mínimo de 13 mm. y que estén espaciados entre sí un máximo de 61 mm.

La idea de colocar un trasdosado de placas de cartón yeso puede surgir con la intención de ahorrarse el material y la mano de obra del recubrimiento, aparte de agilizar la tarea del recubrimiento interior de las paredes. Es posible que esta opción no conlleve un ahorro ya que a mayores es necesario utilizar materiales o mano de obra para rigidizar las paredes. Si nos quedamos con la esbeltez 4/1, necesitamos realizar elementos

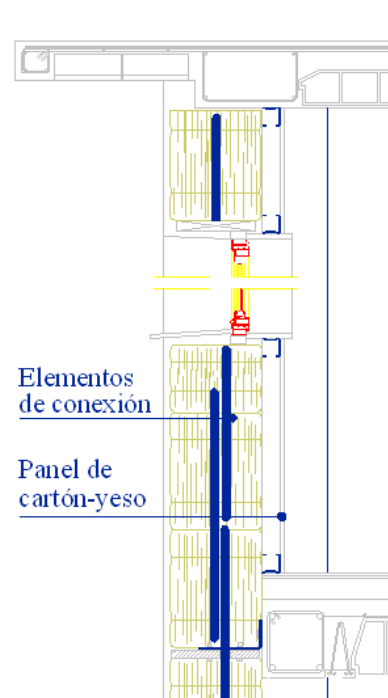


Fig. 12.88- Propuesta de trasdosado interior

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

horizontales de rigidización espaciados de forma que no sobrepasen la altura máxima. Por otro lado, si queremos alcanzar el valor 6/1 de esbeltez, tendremos que utilizar los elementos longitudinales de conexión, que requieren gran cantidad de tiempo para su ejecución.

Es necesario que el trasdosado esté perfectamente ejecutado de modo que no quede ningún hueco abierto que permita que cualquier pequeño insecto entre en la cámara y cree su propio hogar, algo improbable con los recubrimientos directos.

12.6.4 Protección de la fachada frente al agua de lluvia

12.6.4.1 Introducción

Partimos de la base de que el ascenso de agua desde la superficie de apoyo por capilaridad debe estar resuelto de antemano en el sistema de cimentación. El recubrimiento exterior debe tener un zócalo de al menos 15 cm. de altura. El otro gran foco de agua, humedad y posible putrefacción está en la lluvia que pueda incidir en la superficie exterior de pared. Los enfoscados que vimos anteriormente, a excepción del de cemento, (de barro, de cal y mixto) tienen la capacidad de almacenar cierta capacidad de agua de lluvia, sin transmitirla al muro, para posteriormente evaporarla al exterior. Esto ofrece cierta protección de la paja frente al agua de lluvia, pero tampoco es la solución definitiva. Puede darse el caso de que el período de lluvias se prolongue demasiado. Si esto es así, el agua del recubrimiento puede terminar por desplazarse hasta la paja, con las consecuencias que esto acarrea.

12.6.4.2 Lámina impermeable al agua y permeable al vapor de agua

Existen varias empresas que comercializan varios productos de similares características. El producto es básicamente una lámina que se comercializa en rollo de varios tamaños. Suele haber productos específicos para muros y para cubiertas, cambiando además de las propiedades, el tamaño. La lámina se extiende en la superficie a cubrir e impide el paso de agua a su través, permitiendo la permeabilidad al vapor de agua. Esta permeabilidad también es variable según el modelo que se escoja.

Una de las firmas que comercializan este producto es la compañía DuPont, con sede en Luxemburgo, y su producto está registrado con la marca Tyvek. La lámina transpirante está compuesta por millones de microscópicos filamentos de polietileno de alta densidad termo ligados¹.

Es interesante comprobar su funcionamiento, o por lo menos así me lo pareció a mí. Como se ha dicho antes, existen varios tipos de láminas y alguno parece un papel normal de los que utilizamos para escribir. Para comprobar su efectividad se puso bajo el grifo y se accionó el mando. Como no podía ser

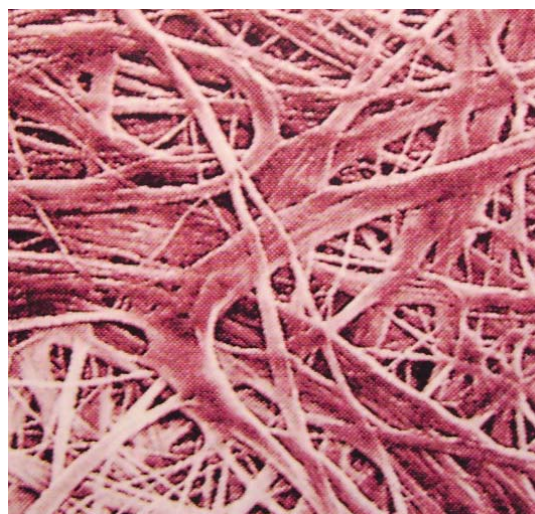


Fig. 12.89- Estructura de las láminas Tyvek [DuPont. Providing protection in construction. Volume 2: walls and floors]

¹ CONFER – DuPont. Providing protection in construction. Volume 2: walls and floors. Catálogo. 32p. Luxemburgo, 2006.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

de otra forma, el agua se quedó moviendo sobre el papel de un lado a otro como si fuese una gran gota. Esto es así por varios motivos.



Fig. 12.90- Empleo de lámina para proteger tableros en la reparación de una cubierta

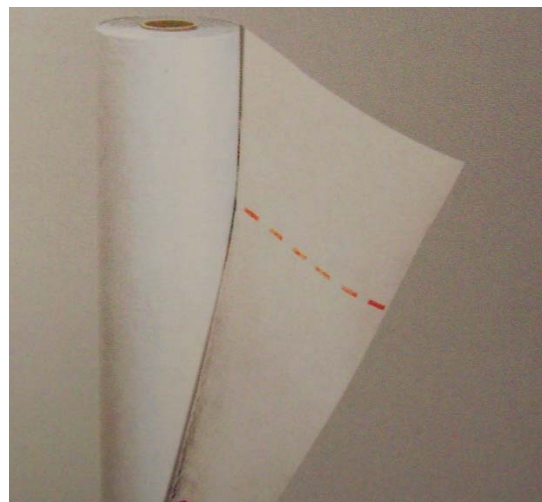


Fig. 12.91- Rollo de lámina Tyvek [DuPont. Providing protection in construction. Volume 2: walls and floors]

Por un lado, el tamaño de los poros del material es inferior al tamaño de una molécula de agua. Por otro lado, la estructura superficial de la lámina tiene una configuración tal que es incapaz de romper la tensión superficial del agua. De este modo, el agua tiene impedido su paso mientras que se garantiza el flujo del vapor de agua.

Este tipo de láminas se comercializan en rollos y se suelen utilizar en cubiertas de madera para evitar las condensaciones a la vez que se impide que se moje la madera. Algunos modelos incluso incorporan una banda autoadhesiva para facilitar el solape entre láminas.

La zona en la que se debe colocar la lámina se debe estudiar con anterioridad según una serie de factores. Una opción sería recubrir toda la fachada por el exterior con este producto, pero es muy posible que esta situación no sea necesaria.

Una posible zona para colocarla sería la fachada en la que la lluvia incide más directamente. En caso de un período prolongado de lluvias, esta sería la fachada más expuesta al agua.

Si es previsible que los períodos de lluvia no se prolonguen mucho en el tiempo, entonces no es necesario que la lámina cubra toda la fachada. Como hemos dicho antes, el recubrimiento con mortero de cal o mixto ofrece cierta protección a la paja en estas situaciones porque tiene la propiedad de poder absorber el agua, almacenarla y luego evaporarla al exterior. De todos modos, sí que puede ser recomendable su colocación en la parte inferior del muro a modo de zócalo hasta una altura aproximada de 1 metro. De los casos analizados de viviendas con problemas de putrefacción de la paja, la gran mayoría concentraba el deterioro en la parte baja de los muros. En caso de ascenso de agua por capilaridad, ésta es la zona de inmediato acceso.

Una buena opción sería incluso asentar la primera fila de balas de paja sobre la lámina, que continuaría hasta aproximadamente el nivel de vierteaguas. En caso de que el ancho de un rollo no sea suficiente para la



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

zona a cubrir se pueden pegar las piezas con cinta adhesiva del mismo material que se comercializa en rollos de cinta.

Una zona que tiene también bastante riesgo de filtración de agua para el interior de la pared es el vierteaguas, sobre todo si éste está en el muro expuesto a la lluvia. Por esto, además de cómo se configure el vierteaguas, en el caso de colocar esta lámina en la parte inferior del muro se puede prolongar hacia el interior del muro en la parte baja del hueco de la ventana, pasando la lámina por debajo del premarco. Cuando se aplique el enfoscado en el exterior del muro también se puede aplicar en el vierteaguas, incluso sirviendo para tomar alguna pieza que se coloque en esta zona.

Cuando esta protección inferior del muro se realiza en muros que cuentan con malla metálica para refuerzo del recubrimiento, puede colocarse de la forma que se indicó anteriormente, quedando situada entre las balas de paja y la malla metálica. Ésta aguanta de la lámina a la vez que colabora en la estabilidad del mortero, cuya adherencia a la pared se va a ver reducida por la incorporación de una lámina de distinto material. Esta merma en la adherencia del recubrimiento con la paja puede afectar a la hora de soportar esfuerzos de viento. En tal caso es recomendable insertar elementos longitudinales de conexión entre las distintas hiladas. De este modo contamos con dos elementos que trabajan cuando actúan los esfuerzos horizontales: la malla metálica en el recubrimiento que ha visto mermadas sus cualidades a causa de la lámina, y los elementos lineales de conexión de las balas.

Si la lámina se coloca en paredes que no van a contar con malla metálica, la fijación de la primera a la pared ya es un poco más compleja. En la base del muro se puede resolver como se indicó anteriormente, pero ahora nos encontramos con que tenemos que fijar la parte superior de esta lámina.

La superficie de este tipo de láminas no tiene una configuración tal que permita al mortero del recubrimiento adherirse a ella. Los fabricantes de las mismas aconsejan, en superficies horizontales o poco inclinadas, en situaciones que se necesite adherencia con el mortero, el uso de un tipo de lámina especial que cuenta con fibras de vidrio en la superficie. Esta configuración mejora en cierto modo la adherencia pero no lo suficiente como para recomendarla sin un refuerzo en paramentos verticales.

Por estos motivos es necesario utilizar en esta misma zona, de forma paralela, una malla metálica o plástica para agarre del mortero. Esta malla puede arrancar igualmente de la base del muro y llegar hasta la altura del vierteaguas. En este punto se puede grapar a las balas o incluso atarla a las cuerdas de las mismas.

12.6.4.3 Bloque preformado con mortero y lámina incorporados

La idea de diseñar este formato de bloque surgió después de conversaciones con personas relacionadas con el tema y que ya habían construido algo con balas de paja. Hasta el momento no se tiene constancia de que exista y se comercialice un producto como este. El que aparece en la imagen no es exactamente el que se va a diseñar a continuación; es una muestra parecida que se hizo con la intención de realizarles una prueba de carga en un ensayo.



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

La propuesta de formato sería como el de la imagen pero ya tendría incorporada la lámina anteriormente mencionada en una de sus caras. Esta lámina debería sobresalir por la parte inferior unos 15 cm., que servirían para solapar con la fila inferior. Ocuparía toda la superficie de una de las caras enfoscadas y también taparía parte de la cara superior de las balas, tal como las vemos en la imagen. Esta parte podrían ser unos 25 cm. y formarían una tira de lámina que se podría grapar a la bala con algún elemento metálico. Esta lámina también debería sobresalir unos 15 cm. a partir de la cara que vemos en primer plano y de su opuesta. Estos serían los solapes entre piezas de la misma fila.



Fig. 12.92- Balas de paja con recubrimiento [Stephen Vardy y Colin MacDougall]

Para este sistema constructivo sería necesario que las balas tuviesen un tamaño lo más uniforme posible. Si se colocan en sentido horizontal, si los fardos están hechos por la misma máquina tendrán todos el mismo ancho ya que la máquina corta todas las fibras a la misma longitud. Lo que puede variar un poco es el largo del bloque porque depende en parte de la compresión que la máquina le imprima.

Una vez fabricado el formato sería colocar unos al lado de otros y una fila tras otra como si de ladrillos o de bloques se tratara. Se podrían asentar con mortero y habría que tener la precaución de colocar bien los solapes. Incluso, si se quisiese, los solapes se podrían pegar con la cinta adhesiva del mismo material. Este sistema constructivo serviría únicamente en el caso de que existiese una estructura auxiliar, de modo que las balas soportaran simplemente su propio peso, ya que no se le podría aplicar precompresión a la pared una vez ejecutada.

El recubrimiento que se le tiene que aplicar a la bala durante la conformación no debe ser el definitivo. Se debe aplicar con un grosor aproximado de 1 cm. menos por cada lado. Este centímetro de material (en unos bloques será más y en otros menos) se aplicaría una vez que se termine de levantar la pared. Incluso se podría colocar algún tipo de malla metálica o plástica fijada en coronación y en base para mayor estabilidad del mortero. A pesar de contar con malla metálica es recomendable insertar elementos longitudinales de conexión entre hiladas.

12.6.4.4 Los estucos

Otra forma de hacer un enfoscado impermeable al agua y permeable al vapor de agua es aplicando un revestimiento continuo al que algunos autores llaman “estuco”. Digo algunos autores porque hay otros que la palabra estuco la reservan para definir el acabado superficial que imita al mármol. Éste no tiene por que imitar al mármol, pero está compuesto a base de cal grasa en pasta, arenas y polvo de mármol, y si procede, pigmentos.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Los estucados están formados al menos por dos capas de masa magra y un repretado. Éste consiste en rellenar con el fratás las coqueras y eliminar los pequeños desniveles para regularizar y conseguir la planeidad del paramento. El grosor final del estuco puede llegar a alcanzar los dos centímetros y sólo tendiendo varias capas delgadas y ejerciendo presión sobre ellas con la herramienta (fratás o llana), puede lograrse la cohesión del estuco y evitar el desprendimiento.

El grosor de cada una de las capas viene dado por el tamaño del grano utilizado. La granulometría varía a lo largo del proceso, y siempre se ha de comenzar con el grano grueso y utilizar las arenas de menor tamaño en las capas de acabado. El material siempre se aplica sobre húmedo y el momento idóneo para tender una capa de estuco es cuando se ha evaporado el exceso de agua del amasado y la masa adquiere la firmeza y solidez suficientes para soportar una nueva aplicación.

Las propiedades del material en sí, sumadas a la configuración de capas comprimidas en fresco, hacen que el resultado final sea un recubrimiento impermeable al agua aunque sin perder la propiedad de permeabilidad al vapor de agua.

Con los estucados se consigue el mismo efecto que con las láminas anteriormente descritas pero con la desventaja de que tienen menor duración y, por tanto, mayor mantenimiento.

12.6.4.5 Otros tipos de acabados

Este mismo efecto se consigue con la aplicación de algún tipo de pintura propia para estas funciones. Este tipo de pinturas las deben aplicar profesionales ya que tienen que ser aplicadas de una forma determinada y con unos espesores determinados para que el poro que tenga la película de pintura sea de un tamaño determinado. Éste debe ser superior al de una molécula de agua en estado gaseoso e inferior al de una molécula de agua en estado líquido.

Otra forma de conseguir este efecto es con el empleo de hidrofugantes de superficie que los hay en base agua y en base disolvente.

12.6.5 Fachadas trasventiladas

Aunque pueda parecer raro, existe alguna construcción que utiliza las paredes de balas de paja como soporte para una fachada trasventilada. Este edificio ha sido construido en el *Center for Appropriate Technology* en Böheimkirchen, Austria, y le han llamado S-HOUSE (S de Strawbale). Se trata de un edificio que combina el aprovechamiento de la energía solar con la utilización de recursos renovables.



Fig. 12.93- S-HOUSE [www.grat.at]

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

La pared está compuesta por las capas que se indican en el esquema que aparece en la figura 12.94.

Fig. 12.94- Composición de la pared de la S-HOUSE [www.grat.at]

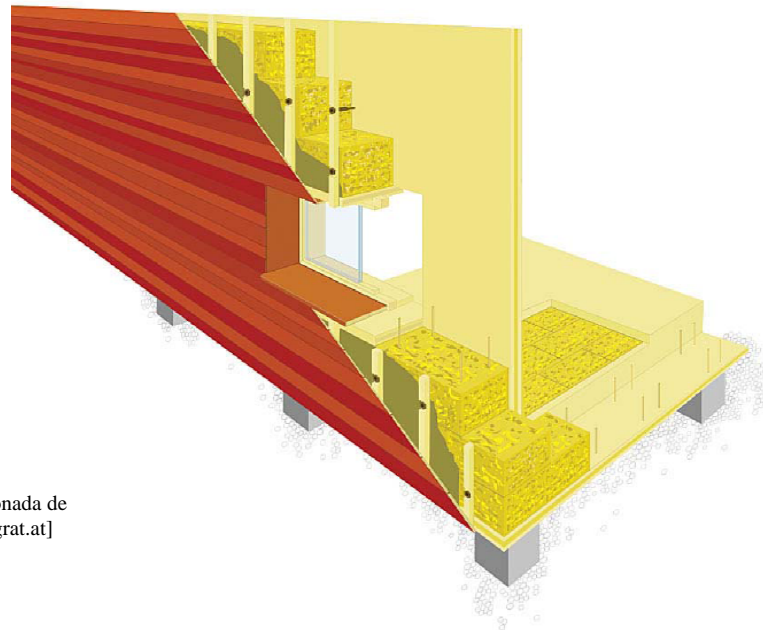
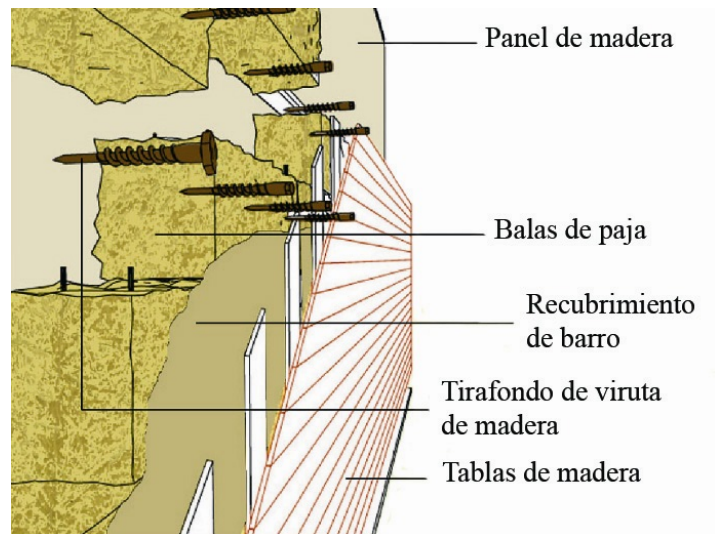


Fig. 12.95- Imagen virtual seccionada de la pared de la S-HOUSE [www.grat.at]

La parte externa de las balas de paja está recubierta con un mortero de arcilla para hacer que éstas sean menos vulnerables. Mediante unos tirafondos de viruta de madera (diseñados especialmente para la S-HOUSE) se fijaron los montantes de madera a las balas de paja. Posteriormente, las piezas de madera se fijaron a estos montantes.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO



Fig. 12.96- Tirafondo utilizado en la S-HOUSE [www.grat.at]



Fig. 12.97- Colocación del tirafondo [www.grat.at]



Fig. 12.98- Tirafondo colocado [www.grat.at]



Fig. 12.99- Montantes colocados [www.grat.at]



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO



Fig. 12.100- Tablas de madera de acabado [www.grat.at]



Fig. 12.101- Acabado de fachada [www.grat.at]

Construyendo con balas de paja nos encontramos con el problema de la fijación de diversos componentes o elementos estructurales a la pared. Los tornillos que se suelen utilizar, en este caso no sirven para hacer una fijación directa sobre el soporte.

Al hablar de balas de paja, no sólo la forma del elemento es importante, sino también el material del que esté hecho. Partiendo de estos condicionantes se procedió a hacer un diseño ecológico de un elemento de fijación. El resultado fue un tirafondo de 365 mm de longitud con lignina procesada. Según los creadores de esta pieza, es resistente al agua pero también es biodegradable, aunque no especifican su durabilidad. El proceso de construcción consiste en la inyección del producto en unos moldes que le dan la forma final.





12.7 Cubiertas

12.7.1 Entramado estructural

Acero

Las cubiertas hechas de armazones de acero son apropiados para edificios de balas de paja. Los entramados de metal pueden ser previamente contruidos o realizados en el mismo lugar. Son ligeros, capaces de abarcar grandes distancias sin soportes, lo que los convierte en buenos candidatos estructurales para edificios grandes¹.

Madera

La madera ha sido un material que se ha utilizado tradicionalmente para realizar el soporte del material de cubrición en las cubiertas. Hoy en día, incluso se utiliza en la rehabilitación de construcciones antiguas. Su facilidad para adaptarse a casi cualquier forma hace que sea muy socorrida para este tipo de entramados, sin contar con que es el material que mejor compagina con la paja.

12.7.2 Tipologías de cubierta

12.7.2.1 Introducción

Se pueden utilizar muchos estilos de cubierta en las construcciones con balas de paja. Sin embargo, el método constructivo del muro de paja puede influir en el tipo de cubierta. Los edificios que utilizan las balas como relleno en combinación con un armazón estructural pueden ser rematados con cualquier tipo de cubierta. Los edificios con muros de carga de paja están más limitados. Estos edificios son más estables a medida que avanza el proceso constructivo y son bastante sólidos cuando la estructura de cubierta está en su lugar. Por esta razón, uno de los favoritos en los primeros edificios de Nebraska se la cubierta a cuatro aguas. Permite a los cuatro muros de carga tener la misma altura y distribuye la carga de la cubierta a los cuatro. Los constructores de estructuras de muros de carga típicamente se inclinaban por plantas y tejados sencillos².

Desafortunadamente, las estructuras de cubiertas, como son contruidas habitualmente para este tipo de construcciones, requieren mucha madera y están sujetas a unas tolerancias muy rígidas. Sería ideal si se pudieran construir con la misma facilidad que uno de paja, exhibiendo las mismas tolerancias y demostrando una reducción similar de madera. El desarrollo de cubiertas con estas características es una de las barreras de la construcción con paja.

Un sistema de cubierta que representa un paso positivo en dicha dirección, aún utilizando una estructura convencional, es la cubierta viva, desarrollada por *ArchiBio*, de Quebec. Las balas se colocan en la cubierta listas para la descomposición, realizando una plantación de semillas de plantas y flores salvajes. Esta cubierta acaba siendo una mezcla entre una cubierta de turba y una de paja³.

¹ CONFER – Athena Swentzell, op. cit.

² CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

³ CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.



12.7.2.2 Cubiertas a cuatro aguas

Es una de las más recomendables para los edificios con muros de carga de balas de paja y también puede ser utilizado con estructuras de balas que no sean de carga. Todos los muros tienen la misma altura y la carga de la cubierta se distribuye a los cuatro muros (aunque no necesariamente en partes iguales), a diferencia de la cubierta a dos aguas, que distribuye la carga principalmente en dos muros.

Otra ventaja de la cubierta a cuatro aguas es que suele verse menos afectado por vientos fuertes que el resto de tejados. Pueden ser contruidos con aleros de buenas dimensiones, que ayudan a proteger los muros de las inclemencias del tiempo y suelen ser fácilmente extendidos formando porches.

12.7.2.3 Cubiertas piramidales

Es esencialmente una cubierta a cuatro aguas pero sin cumbre. Los cuatro pares se encuentran en un punto central en la punta de la cumbre. Un remate de cumbre de cuatro caras ventiladas se puede incorporar en la punta del tejado, siendo funcional por un lado y estético por otro. Esta cubierta tiene la ventaja añadida de distribuir igualitariamente el peso del mismo en las cuatro paredes.

12.7.2.4 Cubiertas a dos aguas

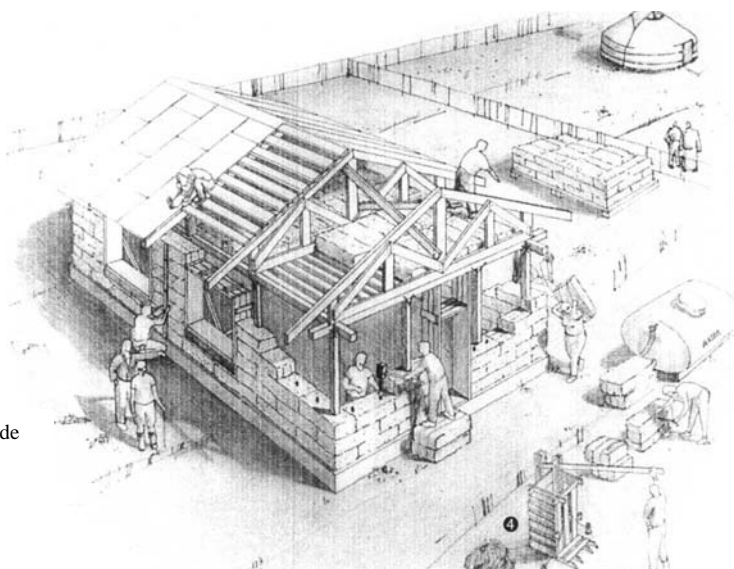


Fig. 12.102- Cubierta a dos aguas en proceso de construcción [S. O. MacDonald, op. cit.]

Esta cubierta ofrece la ventaja de permitir la incorporación de espacio bajo cubierta y de una ganancia solar adicional cuando los huecos de ventana se sitúan al sur. Se pueden utilizar una gran variedad de diseños de cerchas en este estilo de cubierta. En muchas de las casas, los hastiales se arman con balas más que rellenarse con ellas. En algunas construcciones, las balas se extienden por delante de los dos últimos pares o de la última cercha, y son recortadas para adaptarse a la inclinación de la cubierta. No soportan ninguna carga y son confinados por los pares o cerchas, así que, si se colocan cuando la estructura de la cubierta está ejecutada, pueden ser cortados utilizando los pares como guías y sin equivocarse.

En el dibujo anterior, el techo también se recubre con balas de paja colocándolas en el espacio bajo cubierta sobre la estructura de techo.



Fig. 12.103- Proceso constructivo de una cubierta a dos aguas para una construcción con balas de paja [Nathaniel Corum, op. cit.]

12.7.2.5 Cubiertas a un agua

La pendiente de las cubiertas a un agua es solamente en una dirección. Es el sistema de cubierta más sencillo para construir y suele ser económico. Además, es una buena opción para constructores con una experiencia limitada. Usando cerchas simples se permite un espacio bajo la cubierta para un mejor aislamiento térmico. Se pueden construir cubiertas a un agua de manera que dejen un espacio bajo tejado sobre un techo plano.

Hay que tomar precauciones extra cuando se utiliza la cubierta a un agua con muros de carga de balas. Las diferentes alturas de muro requeridas para la pendiente de la cubierta proporcionan una superficie de perímetro continua y regular, y el empuje de los pares al muro de carga más bajo durante la construcción puede provocar que se incline. Un poco de cuidado y un refuerzo o apuntalamiento, si es necesario, es generalmente suficiente para mantener los muros rectos (aplomados). Como en el caso de las cubiertas a dos aguas, hay que recortar los fardos para adaptarlos y encajarlos en la pendiente de los muros que no soportan carga.

12.7.2.6 Cubiertas clerestorio

El nombre procede de la arquitectura gótica. Por aquel entonces se le llamaba clerestorio a la parte alta de los muros laterales de la nave central, zona en la que existían muchas vidrieras que iluminaban el espacio interior.

Las cubiertas de este tipo son, básicamente, dos cubiertas a un agua combinadas, una en pendiente hacia atrás, más pronunciado, y la otra más baja, con pendiente menor hacia delante. Este tipo de cubiertas se utiliza sobre todo en edificios bioclimáticos y también han sido utilizados en construcciones de paja.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

Permiten una ganancia solar directa en las habitaciones situadas en la parte norte de la casa, lo que, en muchas ocasiones, puede minimizar el tamaño o la necesidad de sistemas de calefacción e iluminación¹.



Fig. 12.104- Cubierta Clerestorio
[www.the-home-place.com]

Steve Kemble ha construido tres casas de paja utilizando cubiertas clerestorio. Los casos en cuestión eran diseños enfocados a la captación de la energía solar en los que los edificios tenían una gran profundidad norte-sur. Su casa en Bisbee usaba un diseño híbrido en el cual el clerestorio central fue construido mediante pilares y vigas, mientras que el muro de atrás era de carga². Toda la estructura podía incluso haber sido porticada.

12.7.2.7 Cubiertas planas

Éstas tienen una mala reputación porque llevan una pequeña pendiente (menor que una cubierta inclinada). Tienen mala reputación ya que crean más frecuentemente goteras debido a la pendiente inferior, pero mucho de su mal resultado es achacable a los materiales utilizados y a la mano de obra no cualificada. De todos modos, son más apropiadas para climas poco lluviosos y mínimas cargas de nieve.

Cabe la posibilidad de hacer una cubierta plana ajardinada que serviría de regulador térmico. Sería una posibilidad práctica, efectiva, agradable a la vista y muy natural. Pensando en el proceso constructivo, éste se ve simplificado ya que es más sencillo trabajar sobre una superficie próxima a la horizontal.

¹ CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

² CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO



Fig. 12.105- Vista inferior de una cubierta plana de madera en construcción [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]



Fig. 12.106- Colocación del soporte sobre el que se va a colocar el material aislante (la paja) [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

La paja es un buen aislante térmico en el techo. Se puede colocar de varias formas. Una sería entre viguetas, que es un sistema rápido y cómodo. Se suben las balas enteras y una vez arriba se colocan entre las viguetas y se cortan las cuerdas. Se expanden a lo largo y ya están colocadas. Para proteger la paja frente al fuego se puede asentar sobre una capa de mortero¹.

Una vez puesta la paja se procede a colocar el soporte rígido, apoyado en las viguetas. Este soporte pueden ser tableros de madera aglomerada e hidrofugada. Es necesario que sea hidrofugada por la situación en la que se encuentra. Además, es posible que se produzcan condensaciones en él ya que se encuentra por la cara exterior del aislamiento térmico (la paja). Una solución para evitar esta situación sería colocar sobre esta madera unas planchas de material aislante térmico o colocar ya las planchas que lo incorporan. El material aislante puede ser de espesor reducido ya que la función de evitar las pérdidas de calor la realiza la capa de paja.



Fig. 12.107- Relleno entre viguetas con paja a modo de aislante térmico [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

El siguiente paso sería ya incorporar la lámina impermeable, que puede ser de diferentes materiales, algún tipo de lámina de protección y luego las capas de áridos y de sustrato de este tipo de cubiertas.

¹ CONFER – Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.

12.8 Porches

Los tejados a cuatro aguas, piramidales y a dos aguas son apropiados para que se les añadan porches. El plano de la cubierta se puede extender fácilmente para crear porches parciales o completos alrededor. Los porches dan mayor protección a las paredes de balas contra la humedad y el clima en general.

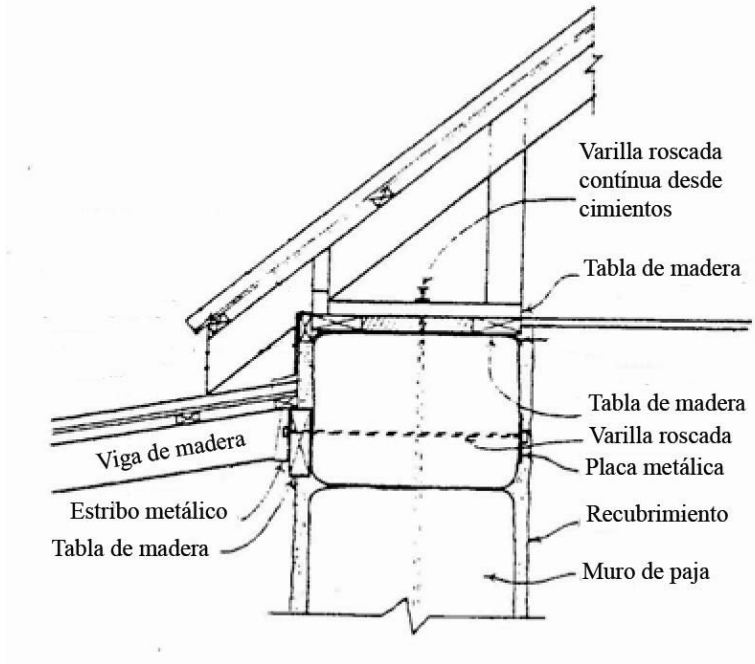


Fig. 12.108- [Athena Swentzell, et. al., op. cit.]

En estructuras que usan muros de balas de paja se necesita un método para añadir porches a no ser que el porche esté sujeto a los pares del alero. En el *Tree of Life Rejuvenation Center* se insertaron unas largas varillas roscadas en la pared para unir una placa de madera en el exterior del muro, justo bajo el nivel del alero del tejado. Grandes placas de metal que servían como arandelas se utilizaron en el interior del muro para evitar que la tuerca se incrustase en la pared.

12.9 Suelos

12.9.1 Introducción

Una de las más importantes características de las balas de paja es que ofrecen mucha dificultad a la transmisión del calor que se genera en el interior. Parece lógico, por tanto, diseñar un suelo que mantenga en lo posible este comportamiento, ya que parte del calor que se genera en el interior se puede perder por la solera.

12.9.2 Forjado sanitario

Una opción para realizar el suelo de la planta baja es realizar un forjado sanitario que en este caso sí podría ser de madera, metálico o de hormigón, porque no tiene bajo él unas paredes de balas que puedan sufrir asientos ante la carga. El forjado supone una opción más laboriosa, pero si hay mucha humedad en el terreno es la mejor solución.

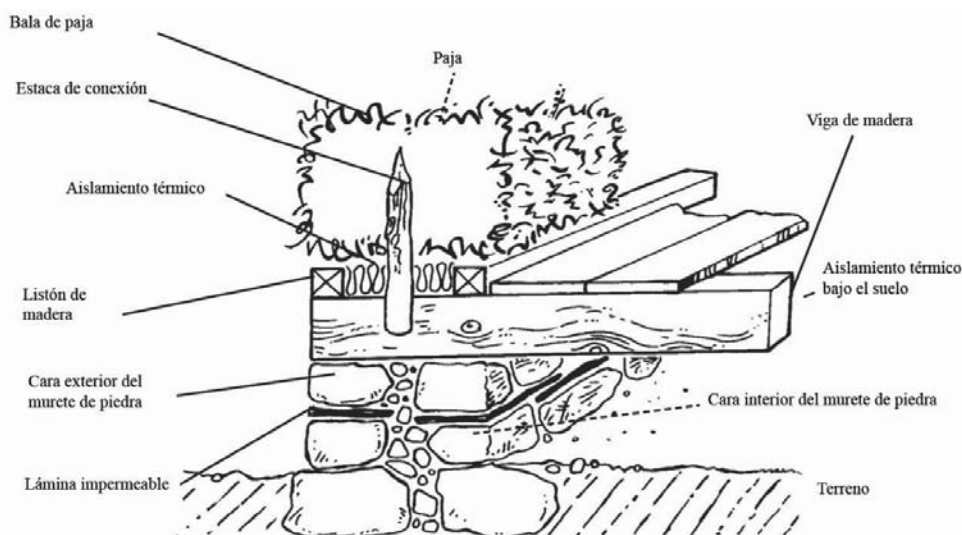


Fig. 12.109- Bárbara Jones, op. cit.

En la imagen anterior aparece un tipo forjado sanitario con vigas de madera sobre las que se apoya directamente un entablado. Térmicamente es una solución muy deficiente ya que parte del calor que evitamos que se transmita al exterior por los muros se va a transmitir por el suelo. En caso de querer realizar un forjado sanitario de madera, podría ser interesante la solución que se propone en la siguiente imagen. En esta solución, las vigas tienen de canto la altura de las balas colocadas en posición horizontal y están colocadas de forma que entre cada dos vigas se puedan colocar las balas en éste sentido. Estas vigas están colocadas con una separación pequeña y tienen mucho canto, por lo que un espesor de unos 10 cm. sería suficiente. En la parte inferior se le fija con tirafondos una tabla de unos 25 cm. de testa y con un espesor no muy elevado. Su única función es servir de apoyo a las balas aunque indirectamente también colabora en la resistencia de las vigas ya que aumenta considerablemente su inercia. En la parte superior de las vigas, y apoyadas y fijadas a

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

éstas, se coloca el entablado que debe ser preferiblemente machihembrado. Esto es así para reducir las posibilidades de que cualquier materia o líquido pueda llegar a las balas de paja. Lo ideal es que se coloquen planchas de fibra de madera aglomerada hidrofugada e ignifugada, y de un espesor no muy reducido. Sobre esta superficie se puede colocar cualquier tipo de pavimento continuo como por ejemplo el linóleo o los PVCs.

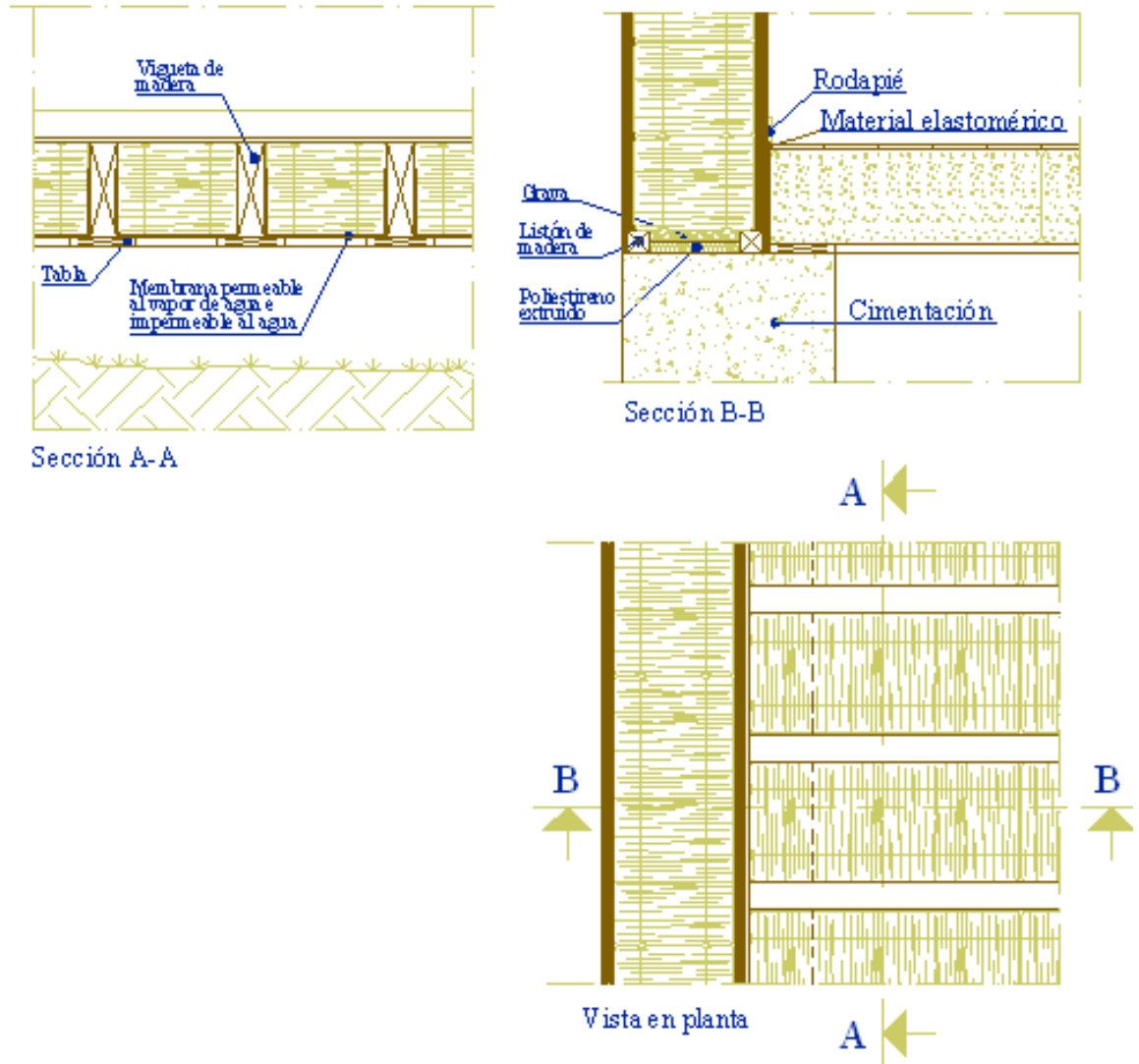


Fig. 12.110- Forjado sanitario de madera

Por la parte inferior de las balas, y para ofrecer cierta protección a las balas frente a la humedad del terreno, se pueden colocar filas de láminas permeables al vapor de agua e impermeables al agua. En las testas de las vigas se deja el espacio necesario para no dañar el recubrimiento de las paredes que se sellará a nivel del pavimento terminado con algún material elástico.

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

De una forma similar a la que se puede utilizar para colocar balas de pajas bajo el suelo se puede realizar la colocación de balas en la cubierta. Las construcciones de balas de paja tienen muy buenas prestaciones térmicas simplemente empleando éstas en las paredes. Empleando las balas de paja en las paredes y en el suelo, el ahorro energético sería muy superior.

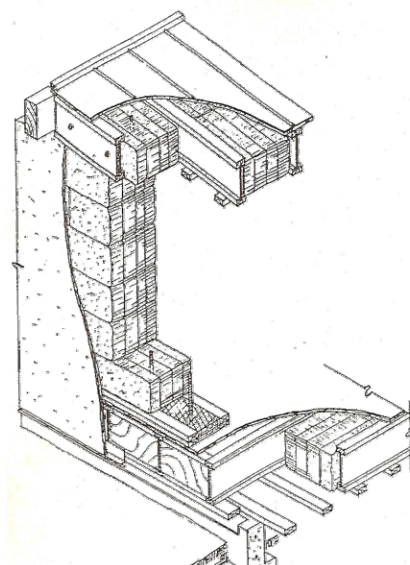


Fig. 12.111- [André de Bouter. Bâtir en Paille. 2006]

12.9.3 Soleras

Las soleras se pueden hacer tanto antes de ejecutar las paredes como después, y cada opción tiene sus particularidades.

En el apartado de cimentaciones hemos descrito el proceso para hacer a la vez la cimentación para los muros de carga y la solera que constituiría un suelo radiante. El aislamiento térmico de este suelo radiante podría haber sido planchas de poliestireno extruído o incluso balas de paja inmersas en el hormigón de la solera. En ese caso analizado, las paredes se ejecutan sobre una plataforma horizontal ya construida. Ante esta situación es necesario tomar ciertas precauciones en el proceso de aplicación de los enfoscados, como ya se explicó en anteriores capítulos. En el caso de que la carga de la cubierta se transmita solamente a las balas y no al

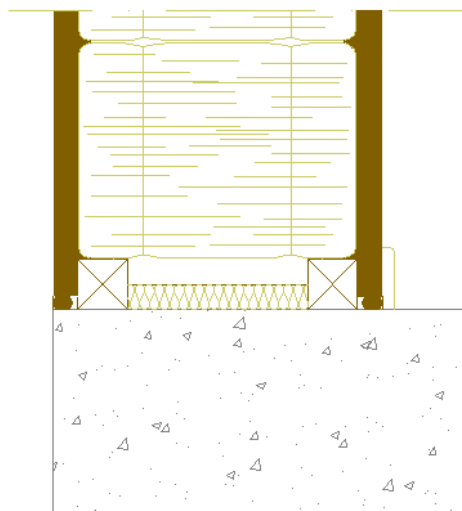


Fig. 12.112

recubrimiento, es posible que sea necesario dejar una junta en todo el recubrimiento en el encuentro con la solera, para evitar posibles roturas del mortero en esta zona. La necesidad de contar con esta junta se reduce si se efectúa la compresión adecuada al nivel de carga que va a soportar la pared. Esta junta se puede sellar con algún tipo de espuma, material elástico o incluso una coquilla de las que se usan para aislar térmicamente las tuberías de agua caliente.

Otra posibilidad es la de realizar las paredes sobre una cimentación corrida y dejar para un momento posterior la ejecución de la solera, que podrá tener prácticamente cualquier configuración siempre que se respeten unos principios generales.

Lo primero que se debe hacer es evitar que el agua del terreno ascienda por capilaridad hacia el suelo. Esto se puede conseguir con una capa de árido de un tamaño de unos 4 cm. aproximadamente. El ascenso del

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

agua del suelo se puede limitar en gran parte con la colocación de un drenaje perimetral, nivel a partir del cual el agua no debería subir salvo por capilaridad.

El siguiente paso es colocar algún tipo de barrera de vapor sobre la cual se puede asentar el aislante térmico, que pueden ser planchas de poliestireno extruído. En este caso es menos razonable realizar el aislamiento térmico con las balas de paja ya que para ello habría que realizar un vaciado del terreno considerable y resultaría complicado una vez construidas las paredes. El aislamiento térmico se cubre con algún tipo de mortero y a partir de ahí se realiza el acabado del pavimento que se quiera. Existe algún caso en el que el aislamiento térmico, en vez de realizarlo con planchas de poliestireno extruido, se hizo con paja suelta mezclada con barro.



Fig. 12.113- Paja como aislante térmico de la solera para ser mezclada con barro [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]



Fig. 12.114- Aplicación del barro sobre la paja en la solera [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]



Fig. 12.115- Colocación de baldosas con un mortero de agarre sobre la mezcla de barro y paja [Patricia Cebada y Rubén Solsona, op. cit.]

La solera se puede hacer antes o después del enfoscado interior de las paredes. Sea como sea, la solera necesita una junta perimetral para ser independiente de las paredes. Esto se puede realizar colocando perimetralmente unas planchas de poliestireno extruído. Al igual que en el caso anterior, es posible que sea necesario que el recubrimiento de las paredes no se encuentre en su parte inferior con un elemento rígido que provoque la rotura de toda esta zona. Asimismo se debe sellar la junta con algún tipo de material elástico, junta que puede quedar oculta con la colocación de algún tipo de rodapié, aunque no sea necesario su uso.

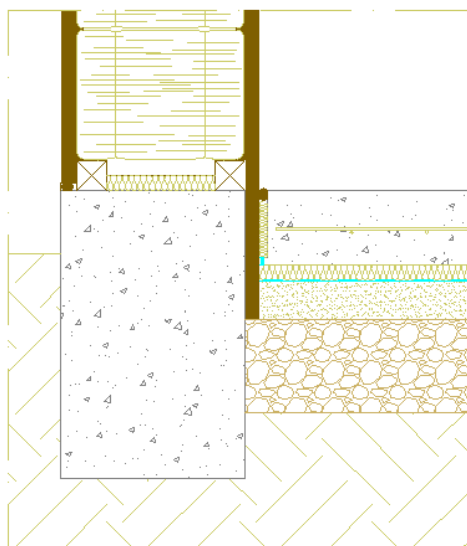


Fig. 12.116- Encuentro de solera con muro

12.9.4 Suelos de barro y paja

Los suelos de barro son los más viejos de la historia y se han utilizado en todo el mundo. En el sudoeste de Estados Unidos, los suelos de tierra vertida o adobe eran la norma, anteriores a la utilización de madera, ladrillo u hormigón en los suelos. Pueden ser bonitos, suaves y cálidos, y cuando se realizan con un buen acabado y un buen tratamiento de superficie, resultan unos suelos cómodos, prácticos y de aspecto natural¹.

En el Reino Unido existen muchos constructores que dedican su tiempo a combinar materiales naturales para aplicarlos en la construcción. Éste es el caso de Talmath Mesinbrink y sus suelos de adobe. Él ha cooperado en muchos proyectos de construcción, pero existen muchas otras personas haciendo una labor similar.

Talmath se ha especializado en los suelos de adobe, los recubrimientos de barro y las pinturas con arcilla. Para los primeros utiliza una mezcla de un 25% de arcilla con un 75% de arena y suficiente agua para hacer una pasta boscosa. Una vez que esta pasta está hecha se le aplican cantidades de paja picada con una longitud media de unos 5 centímetros².

Esta mezcla húmeda se aplica una vez que está colocado el aislamiento térmico en el suelo y se suele hacer con espesores en torno a los 5 cm. La primera fase de vertido de un suelo de barro y paja es similar a la

¹ CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

² CONFER – Kelly Hart. The beauty of mud and straw [on line]. [Consulta: 26 de agosto de 2006]. Disponible en web: <<http://www.greenhomebuilding.com>>

CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

del vertido de hormigón, en la que el material húmedo es extendido hasta que alcanza la horizontalidad. Con el hormigón, sin embargo, todos los trabajos de acabado se deben hacer dentro de las siguientes horas de la aplicación, antes de que endurezca demasiado. Con los suelos de barro y paja, los procesos de curado y acabado pueden prolongarse durante semanas o incluso meses.

Una vez que se ha realizado el vertido, nivelado y ha endurecido lo suficiente como para poner con cuidado peso sobre él, el proceso de presionado con una herramienta metálica para endurecerlo puede comenzar. La razón de esto es crear una masa monolítica ya que, según se va secando, van apareciendo fisuras que deben ser selladas. Otra razón es para presionar la superficie para endurecerla de cara a la durabilidad, y para hacer que cierto contenido de arcilla aflore a la superficie para un acabado más vistoso. Es posible añadir en la superficie finas capas de arcilla coloreada y posteriormente aplicar una fina capa de cera. Estas capas pueden ser una mezcla de colores de origen natural. También se pueden añadir óxidos para alcanzar el color deseado¹.

El proceso de compresión del adobe es un trabajo duro y difícil. Se debe hacer de rodillas, con mucha fuerza y con una técnica específica para conseguir el resultado deseado. Según se va secando la mezcla de barro y paja se puede ir humedeciendo con un spray de agua para poder continuar con el trabajo. Éste se debe hacer más por el tacto que por el aspecto visual.

Una vez que se está satisfecho con el aspecto final, y el suelo está completamente seco, se puede sellar con varias capas de aceite u otros acabados. Normalmente, la primera capa es de aceite de linaza que ha sido calentado para que penetre mejor en el soporte. Una capa final con un aceite de mayor dureza le puede dar el acabado final². La forma más sencilla de aplicar las capas es un rodillo de pintura, utilizando una brocha para las esquinas. Una empresa llamada Bioshield fabricaba un producto muy bueno que se llamaba “impermeabilizante de aceite



Fig. 12.117- Aspecto final de un pavimento de barro y paja

penetrante”, que consistía en aceite de linaza hervido, aceites herbales y secador sin plomo³. Costaba más o menos el doble que el aceite de linaza convencional, pero el hecho de no ser tóxico hace pensar que merece la pena el coste extra⁴.

El trabajo de colocar un pavimento de barro y paja es normalmente lo último que se hace en el proceso de construcción, ya que el suelo no se puede pisar mientras está curando. Las personas que hacen

¹ CONFER – Kelly Hart, op. cit.

² CONFER – Kelly Hart, op. cit.

³ CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

⁴ CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.



CAPÍTULO 12 – PROCESO CONSTRUCTIVO

este trabajo salen con mucho cuidado para no dañar las zonas tratadas. El resultado es un suelo de aspecto agradable y bastante duradero si se trata correctamente.

Por último, el suelo puede encerarse con cera normal para suelos o cera de abeja para una mayor protección. En cuanto salga una grieta, se ablande el suelo o salten pequeños pedacitos debido al uso, si no se repara a tiempo, el agujero se agranda hasta hacer un bache. La reparación, si hiciera falta, es sencilla. Se añade nueva mezcla de barro (es recomendable haber guardado cierta cantidad del producto en el momento de la aplicación), mezclada con agua, que se aplica en el agujero. Una vez que el barro se haya secado ya se puede sellar de nuevo¹.

La paja y el adobe son una pareja de materiales que van de la mano en las casas con diseños solares pasivos. Con la paja se crean paredes con niveles de aislamiento térmico elevados que mantienen el interior de la construcción con una temperatura agradable. Los suelos de barro y paja y los recubrimientos de las paredes de los mismos materiales proporcionan masa térmica para almacenar el calor y devolverlo al interior durante la noche. Cuando se combina con una calefacción por suelo radiante, el resultado es de gran confort².

12.9.5 Varios

Una vez realizada la solera, con la configuración que necesitemos o que queramos, podemos pensar en las múltiples soluciones que conocemos de pavimentos porque en principio cualquiera sería posible. El punto delicado de los pavimentos es el encuentro con las paredes de balas de paja, y más concretamente con los enfoscados. Si es el enfoscado el que continúa y el pavimento se para antes de tocar el paramento, el espesor de la junta puede ser suficiente con 1 cm. Si por el contrario es el pavimento el que continúa hasta la bala de paja de forma que es necesario parar el enfoscado antes de llegar al suelo, el espesor de la junta debe ser un poco superior, llegando incluso a los 2 centímetros.

¹ CONFER – Athena Swentzell et. al., op. cit.

² CONFER – Kelly Hart, op. cit.



*C*apítulo 13

ASPECTOS NORMATIVOS



CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

13.1 Introducción

En la actualidad solo existe un país que tenga una normativa específica sobre la construcción con balas de paja en Europa, que es Alemania. A pesar de esto, muchas casas que utilizan este sistema constructivo han sido construidas legalmente en Gran Bretaña, Irlanda, Bélgica, Francia, Holanda, Austria,... La gran mayoría son viviendas unifamiliares autoconstruidas, pero ya existen construcciones de organismos públicos en algunos países. El número de construcciones con balas de paja es bastante superior al que mucha gente puede pensar y se prevé que este número siga en aumento de una forma ligeramente más pronunciada.

En el año 1989 Clark Sanders consiguió el primer permiso para una construcción con balas de paja en Kortright, Nueva York¹. A fecha del 8 de Enero de 2006, el número total de construcciones con balas de paja que constaba en algún tipo de registro en cualquier parte del mundo ascendía a 1.213. En España se tenían identificadas 4 construcciones, mientras que en Francia había 10, en Australia 26 y en Canadá 59. Los países con mayor número de construcciones de este tipo eran Estados Unidos, con 466, y China, con 597².

En las distintas partes del mundo nos podemos encontrar con distintas formas de actuar ante una realidad, como puede ser la de querer realizar una construcción con balas de paja. Las distintas posibilidades que pueden existir se presentan a continuación, de la menos restrictiva a la más restrictiva³.

1. Ausencia de normativa.

En este caso se podría construir legalmente lo que se quiera y dónde se quiera. Suele ser el caso de países muy poco desarrollados.

2. Construcción exenta de permisos de construcción.

Puede darse el caso de que existan varios tipos de construcciones para los que no sea necesaria una autorización debido a las características de la misma (tamaño, uso,...).

3. Normativa con mandatos generales sobre la construcción con paja

Tales mandatos son generales, no estableciendo ningún tipo de limitación.

4. Normativa que contemple materiales alternativos, diseños y métodos.

Aunque no contemple específicamente las balas de paja, sí deja una ventana abierta para técnicas poco comunes. El solicitante tiene la responsabilidad de demostrar la equivalencia con las exigencias de dicha normativa, tales como exigencias estructurales, resistencia al fuego, o ventilación.

¹ Bruce King con Martin Hammer. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7

² CONFER – Strawbale Building Registry. Número total de las construcciones con balas de paja registradas con fecha de 8 de Enero de 2006 [on line]. [Consulta 25 julio 2006]. Disponible en web: <<http://www.greenbuilder.com>>

³ CONFER – Bruce King con Martin Hammer, op. cit.





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

5. Normativa que incorpore pautas para la construcción con balas de paja

Estas pautas pueden no estar legalmente adoptadas pero sí ser utilizadas informalmente. Algunas veces son creadas por algún organismo legislador, otras veces son copiadas de alguna normativa existente, o incluso tomadas de algún libro. El *California Straw Bale Code* es un conjunto de pautas que han sido adoptadas formalmente por algunas jurisdicciones mientras que son utilizadas informalmente en muchas jurisdicciones de dicho estado.

6. Normativa de balas de paja

En los Estados Unidos dos estados, al menos diez condados y al menos seis ciudades han adoptado oficialmente una normativa de balas de paja. Fuera de Estados Unidos, Bielorrusia y Alemania también lo han hecho. Dentro de estas jurisdicciones se pueden realizar construcciones con balas de paja que cumplan con dicha normativa.

7. Prohibición de construcción con balas de paja

En contadas ocasiones se ha llegado a prohibir este tipo de construcción.

13.2 Normativa sobre construcción con balas de paja a nivel mundial

Las primeras normativas de balas de paja aparecieron en los Estados Unidos y no han seguido el ritmo marcado por la tecnología de la construcción con balas de paja y de la práctica habitual. Fuera de los Estados Unidos, únicamente dos países han adoptado oficialmente una normativa de estas características, y son Bielorrusia y Alemania. Sin embargo, la práctica de la construcción con balas de paja a lo largo del mundo está muy extendida, superando en muchos casos en innovación a la de los Estados Unidos.

A continuación se presenta una breve descripción de la situación de dicha construcción en todo el mundo.

Australia

La construcción con balas de paja está aceptada dentro de la normativa de construcción del país. Está clasificada como una solución alternativa pero no está exenta de cumplir con unos requisitos como pueden ser la resistencia al fuego o la accesibilidad.

Bielorrusia

En 1999 establecieron una regulación para la construcción de balas de paja con la clasificación de “Experimental”. En 2001 adquirió la categoría de “Technical Condition” y se espera que, tras varios años de éxito, en el año 2007 alcance el máximo nivel “State Standard”. Dicha normativa contempla las balas de paja como simple material aislante de cerramiento.

Canadá

La construcción con balas de paja está siendo aprobada caso a caso con dificultad. La realidad es que la autorización depende de la buena voluntad del funcionario al que le corresponda esta función y se hace





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

justificándolo como un material alternativo. El proyecto debe ser realizado por un profesional que debe demostrar con documentación su comportamiento.

Centroamérica

Construcciones con balas de paja se han realizado en países como Costa Rica o Nicaragua, y la mayor parte de estas, no todas, en zonas en las que no existe normativa o sí que existe pero hay poco control sobre su cumplimiento.

China

Cientos de viviendas de balas de paja se han construido en China en los últimos 8 años, en gran parte gracias a los esfuerzos de la Arquitecta Estadounidense Kelly Lerner, que desarrollo un programa de viviendas en este país. En China aún no existe normativa sobre construcción con balas de paja pero todas cuentan con la autorización gubernamental.

Dinamarca

En 2004, el *Danish Building and Urban Research Institute* publicó un documento que era una recopilación de ensayos realizados con las correspondientes recomendaciones. El documento no es de obligado cumplimiento pero está publicado por el único organismo del país que publica dichas normas.

Francia

Todos los materiales de construcción están permitidos, ya que la legislación francesa dice claramente que es ilegal denegar un permiso de construcción basándose en el material elegido. Esto facilita la construcción pero se encuentran con que no pueden asegurar sus viviendas una vez construidas.

Alemania

En Febrero del 2006 el gobierno alemán aprobó una normativa de balas de paja en la que se autoriza simplemente como material de cerramiento sin función estructural. Hasta este momento los casos eran estudiados uno a uno antes de conceder la autorización. De esta forma se habían concedido autorización a 31 construcciones que habían presentado informes de estabilidad del material, conductividad térmica o resistencia al fuego.

Irlanda

Las *Irish Buildings Regulations* son simplemente pautas, por lo que el proyectista tiene la responsabilidad de demostrar el cumplimiento de los reglamentos. No existen demasiadas dificultades para conseguir una autorización para construir, tanto con función estructural como de cerramiento.





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

Italia

Existen únicamente dos construcciones de balas de paja que cuenten con los permisos necesarios y ambas emplean la paja como simple cerramiento. La normativa italiana es muy estricta por lo que se ve difícil conseguir autorización para la función estructural.

Japón

El *Japanese Building Code* simplemente mencionaba la madera, la mampostería, el acero y el hormigón, pero en el año 2002 se sustituyó por un *Performance-Based Code*. De esta forma, si la construcción cumple con los requisitos estructurales, puede ser construida.

Méjico

La mayor parte de las construcciones de balas de paja de Méjico han sido realizadas en zonas en las que no eran necesarias las autorizaciones para ello.

Mongolia

Se han construido unas 50 viviendas y docenas de clínicas de salud con balas de paja, la mayoría de ellas con autorización para ello. En el año 1998 se comenzó a trabajar en una normativa específica que aún no se ha implantado por problemas burocráticos.

Holanda

En general no existen demasiadas dificultades para conseguir autorización de construcción. La diferencia entre conseguirlo y no conseguirlo depende en gran medida de lo bien documentado que esté el proyecto.

Nueva Zelanda

No existe una normativa propiamente dicha sobre este tipo de construcción. Lo que sí existen desde el año 1998 son unas pautas que se utilizan de modo informal.

Arabia Saudí

Más de 30 viviendas han sido autorizadas simplemente con presentar un proyecto redactado por un profesional de forma que se cumplan las *National Buildings Regulations*. Conseguir que un banco financie la construcción ya no es tan sencillo, por lo que la mayoría de éstas son autofinanciadas, y algunas incluso autoconstruidas.

Sudamérica

El número de construcciones con balas de paja documentadas en Sudamérica no es muy elevado, aunque se sabe que existen algunas en Chile, Argentina, Uruguay e incluso en Perú, construidas posiblemente todas sin autorización.





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

Reino Unido

Durante diez años se han estado construyendo viviendas de balas de paja con autorización. Las *National Buildings Regulations* marcan unas pautas para una buena práctica constructiva, siendo las autoridades locales las que tienen que certificar que se cumple esta buena práctica constructiva.

13.3 Normativa en Estados Unidos

13.3.1 Introducción

El país pionero en la construcción con balas de paja fue EEUU, por lo tanto, también lo ha sido en el aspecto legal y normativo. El resurgir de esta construcción se produjo en 1984 con la publicación del artículo “fine home-building magazine” por el arquitecto John Hamond. Siete años más tarde, en 1991, se construyó en Nuevo Méjico la primera casa asegurada, hipotecada y legalizada. Ese mismo año se legalizaron 10 construcciones más. En Nuevo Méjico y en Arizona se crearon unas normativas específicas para construcción con balas de paja. Posteriormente también se crearon en California.

13.3.2 Normativa de construcción estadounidense

Una de las normativas (Codes) más detallada es la de Arizona (Annotated Prescriptive Building Code for Load-bearing and Non-Loadbearing Straw Bale Construction) con fecha de 1996 y que establece unos estándares mínimos de seguridad para la construcción de estructuras que usan balas de paja, tanto como elemento estructural como de relleno. Otro que también está muy desarrollado es el Código de California (California Straw-Bale-Code).

California Straw Bale Code (1995)

Este documento establecía unas pautas generales para la construcción con balas de paja en cualquiera de sus sistemas constructivos, pero a la vez, limitaba su operatividad a aquellos condados en los que se hubiesen hecho estudios demostrando la efectividad del sistema.

El código nace a partir de una necesidad urgente de viviendas de bajo coste y eficientes energéticamente. El precio de las construcciones de madera se estaba incrementando a causa de la deforestación. Paralelamente, el volumen de la paja de arroz que se permitía quemar iba en descenso, por lo que era necesario favorecer nuevos usos para ésta. Las leyes de construcción existentes hasta el momento restringían de forma considerable el desarrollo de este sistema constructivo, por eso se optó por crear un código específico. Éste pretendía marcar unas pautas para la construcción, incluyendo viviendas unifamiliares que utilizaran las balas, tanto para muros de carga como para simple cerramiento.

Pautas para los materiales

- Las balas deben tener una forma rectangular (debe ser un prisma rectangular)
- Las balas utilizadas dentro de una pared deben ser de altura y espesor constante para asegurar una buena transmisión de cargas dentro de las mismas.





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

- Cada bala debe tener ataduras de cuerdas y las que las tengan rotas no se pueden utilizar no se podrán utilizar a no ser que se vuelvan a atar, y esta nueva atadura garantice el grado de compactación que existía antes.
- El contenido de humedad no excederá el 20% del peso total de la bala. Este dato se obtendrá como promedio de 5 medidas realizadas en el centro de las balas.
- Las balas utilizadas en los muros de carga deben tener una densidad seca superior a 110 Kg/m³.
- Cuando sea necesario hacer modificaciones en los tamaños de las balas, la pieza resultante tendrá la misma densidad, la misma tensión en las ataduras y, si es posible, el mismo número de cuerdas que la bala anterior.
- Son admisibles las balas de varios tipos de paja como la del trigo, arroz, centeno, cebada, avena y plantas similares siempre que cumplan los requisitos mínimos de densidad, forma, contenido de humedad y ataduras.

Pautas para la construcción

- Las paredes de balas de paja, cuando sean recubiertas con un mortero, deben ser consideradas como para tener la resistencia al fuego equivalente a una construcción de estructura de madera que tenga el mismo acabado.
- El espesor mínimo de la pared de balas debe ser de **33 cm**.
- Las construcciones con balas de paja no deben sobrepasar una planta de altura y la relación entre la altura y el espesor no debe exceder una proporción **5,6:1**.
- La relación entre la distancia de fijaciones del muro y el espesor del mismo debe ser inferior a **15,7:1**.
- La carga máxima admisible (peso propio de los elementos y sobrecarga de uso) en la coronación de las paredes de balas de paja no debe superar los **19 kN/m²**, y la carga resultante debe actuar en el centro de la pared. Las estructuras de balas de paja se deben diseñar para resistir tanto cargas verticales como horizontales.
- El ancho mínimo de la cimentación del muro debe ser el de las balas que soporte excepto en el caso de que se coloque un material de aislamiento térmico en el perímetro de la cimentación, en cuyo caso las balas podrán volar sobre la cimentación un máximo de 7 cm. La cimentación debe profundizar un mínimo de 30 cm. a partir del nivel del terreno natural.
- Las barras metálicas para fijar la pared de balas a la cimentación deben profundizar en ésta un mínimo de 18 cm. y deben sobresalir un mínimo de 30 cm. Estas barras verticales deben estar colocadas a lo largo de la línea central de la pared.
- Las paredes de balas de paja que limiten con una de balas de paja deben ser fijadas mediante listones de madera o por medio de barras de acero. En cada fila de balas debe coincidir uno de estos elementos que debe penetrar en las balas no menos de 30 cm.
- Las paredes que soporten cargas deben ser fijadas y atadas a la cimentación a intervalos de 1,80 metros o menos. Siempre debe existir una de estas ataduras de cada pared a menos de 90 cm. de las esquinas.





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

- En las paredes que soportan carga, la carga de los tejados o los forjados produce una compresión en la pared. A pesar del sistema de fijación de la coronación a la base, antes de la aplicación de los recubrimientos finales se deben volver a tensar estas ataduras.
- Se debe utilizar una barrera contra la humedad entre la cimentación y la primera fila de balas para evitar que la humedad llegue a alcanzar a éstas.
- Para los muros que no sean de carga, las balas se pueden colocar tanto en horizontal como en vertical. En los muros de carga se deben colocar en horizontal y de forma que cada bala tenga un solape superior a 30 cm. con una de las de la fila inferior. Los espacios inferiores a 15 cm. entre balas de la misma hilada se rellenarán con paja suelta ejerciendo presión.
- La primera fila de balas se debe colocar atravesando los conectores verticales que hay en la cimentación. Cuando se coloque la cuarta fila de deben clavar unas estacas de suficiente longitud para solapar con los de la cimentación, teniendo precaución de que no se hagan pasar por la junta vertical entre dos balas. Este sistema se debe continuar hasta llegar a la coronación del muro.
- En las esquinas de las paredes de balas de paja únicamente se podrán colocar balas de tamaño completo.
- Todas las paredes de balas de paja deben tener una estructura de coronación para poder conectar la estructura de cubierta con la de cimentación. Esta estructura de coronación debe ser continua a lo largo de todas las paredes.
- Todos los huecos en las paredes de balas de paja deben estar a una distancia mínima de una bala de paja de cualquier esquina, a no ser que se trate de excepciones que justifique un ingeniero o un arquitecto.
- Cuando se utilicen dinteles sobre aberturas en las paredes, éste tendrá una longitud igual o superior a dos veces la longitud del hueco, y en cada lado del hueco debe profundizar un mínimo de 60 cm.
- Todas las paredes deben ser protegidas contra los daños del agua de lluvia. Sin embargo, las barreras de vapor no se deben utilizar en los dos tercios superiores de la pared para permitir la transpiración natural de las balas.
- Las paredes de balas deben tener una protección especial en los alféizares de las ventanas. A no ser que estén protegidas por una cubierta, la coronación de las paredes debe incluso ser protegida.
- Tanto la superficie interior como la exterior de las paredes de balas de paja debe ser protegida frente a golpes, al fuego, a los animales y a la exposición prolongada al agua de lluvia. Las paredes que delimitan el espacio de los locales húmedos se deben proteger con cualquier barrera de vapor.
- El mortero del recubrimiento debe ser reforzado con una malla metálica. Ésta debe ser fijada por medio de ataduras espaciadas un máximo de 60 cm. en horizontal y 40 cm. en vertical.
- Cuando las balas acometan con una pared de otro material, el recubrimiento se debe reforzar con una malla metálica que solape con la pared de balas de paja un mínimo de 15 cm.
- Las canalizaciones de agua o de gas que discurran por paredes de balas de paja deben ser recubiertas con una tubería para prevenir fugas dentro de la pared. Cuando estas canalizaciones





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

crucen por estas paredes, las primeras deben ser protegidas para evitar que cualquier condensación pueda dañar a la paja.

En Enero del año 2002 se publicó en California un nuevo código de la bala de paja que básicamente comprendía lo ya mencionado en el anterior pero que introducía alguna modificación como las indicadas a continuación:

- La carga máxima admisible en la coronación de los muros de carga de balas de paja recubiertas con mortero de cemento o de cal y cemento no debe superar los **11,68kN/m**.
- Todas las paredes de balas expuestas a la lluvia deben ser protegidas frente a ésta. No se deben utilizar barreras de vapor. El proyectista debe diseñar las paredes de forma que no existan membranas entre las balas y el recubrimiento, excepto para permitir la transpiración natural de la pared y de forma que se garantice la unión entre el recubrimiento y la paja.
- Las balas de paja deben ser protegidas de la lluvia durante todo momento hasta que esté construida la cubierta que las proteja.

En la actualidad, Diciembre de 2006, el *California Department of Housing and Community Development* está desarrollando un nuevo *Straw Bale Code* que posiblemente sea incorporado como un apéndice del *2007 California Building Code*. El borrador que existe en la actualidad está estructurado de la siguiente forma¹:

1. Generalidades
2. Definiciones
3. Características de las balas
4. Humedad
5. Aspectos estructurales
6. Acabados
7. Resistencia al fuego
8. Instalaciones eléctricas

En Estados Unidos son varias las ciudades, condados o estados que han adoptado unas normas para la construcción con balas de paja. El estado de Colorado, condado de Clark, ciudad de Cortez, estado de Nevada, estado de Nuevo Méjico, ciudad de Tucson o condado de Taos son algunos de los organismos que han aprobado documentos referidos a este sistema constructivo. Todos ellos son prácticamente iguales, salvo algunos casos en los que se ha introducido alguna modificación o se contempla algún aspecto a mayores. La mayor diferencia se puede ver en que hay alguno de estos documentos que simplemente permite la opción no estructural, como el caso de Nuevo Méjico, mientras que la mayoría de ellos contemplan todas las soluciones.

¹ CONFER - Bruce King. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

La inexistencia de un Straw Bale Code en algunas zonas de EEUU no impide la construcción. En todas estas zonas se han conseguido permisos para construir, aunque a costa de aportar cierta documentación a la hora de realizar la solicitud. Esta documentación suele incluir resultados de ensayos realizados por organizaciones como la *Ecological Building Network* o el *Development Center for Appropriate Technology* o incluso resultados de ensayos de diversas universidades.

13.3.3 Compañías aseguradoras

Una vez que los gobiernos de los distintos estados autorizan la construcción de viviendas de balas de paja, los propietarios de éstas tienen los mismos derechos que cualquier otra persona que posea una vivienda realizada con otro sistema constructivo. Es por esto por lo que en este país existen muchas compañías aseguradoras que contemplan entre sus cometidos el de asegurar este tipo de viviendas. Pero no es éste el único país en el que aseguren las viviendas de balas de paja, sino que existen muchos otros como Australia, Canadá, Francia, Israel, México, Nueva Zelanda, o Sudáfrica. Lógicamente, el país con un mayor número de entidades que aseguren viviendas de paja es Estados Unidos, seguido de Canadá y Australia.

13.4 La situación en España

13.4.1 Proceso administrativo para construir una vivienda

Construir una vivienda de balas de paja, conseguir un préstamo hipotecario y asegurar la construcción es posible ya que así lo demuestran las casas legales que existen en nuestro país. No obstante, al tratarse de un sistema de construcción innovador y poco conocido, el proceso se puede hacer muy difícil y largo. Los pasos a seguir en la legalización de una construcción con balas de paja son los mismos que en el caso de una construcción convencional, pero pueden surgir más dificultades ya que el desconocimiento impide dar respuestas claras y concisas tanto de colegios profesionales, ayuntamientos, bancos y compañías aseguradoras¹.

El primer paso de todo el proceso sería redactar el proyecto. La principal diferencia de este proyecto con otro cualquiera de una vivienda convencional sería el material del cerramiento de la construcción que vayamos a realizar. Dicho proyecto se debe realizar cumpliendo todas las normativas que le afecten (urbanísticas, habitabilidad, accesibilidad,...). El Código Técnico de la Edificación (CTE) no contempla la paja embalada como material de construcción, por lo que habrá aspectos del proyecto que no cumplan dicho código. De todos modos, esta normativa permite la utilización de materiales y sistemas constructivos novedosos bajo la responsabilidad del proyectista, como veremos en el apartado correspondiente al CTE.

El proyectista debe remitir el proyecto a los colegios profesionales para que lo revisen antes de continuar el proceso. Según consultas realizadas al Colegio Territorial de Arquitectos de Alicante (en Alicante existe una vivienda que cuenta con todos los permisos), no entra dentro de sus funciones autorizar o prohibir los materiales que se empleen en una construcción, por lo que se podría, y de hecho se han podido, conseguir los visados colegiales.

¹ CONFER – Red de construcción con balas de paja, op. cit.





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

Una vez que está redactado el proyecto de forma que cumpla toda la normativa aplicable, y pasado el trámite del visado colegial, el siguiente paso es presentarlo en el ayuntamiento para conseguir la licencia de obras. Las normas urbanísticas son distintas de unos municipios a otros pero en el caso de Galicia todas tienen que cumplir con las directrices marcadas por la *Lei de Ordenación Urbanística e Protección do Medio Rural de Galicia*. Dicho documento, como sucede con tantos otros, no hace referencia a la paja como material de construcción, por lo que no impide su uso como tal. Las normas urbanísticas municipales sí que suelen hacer referencia a materiales autorizados y no autorizados, pero hasta el momento no se tiene conocimiento de que se contemple en algún municipio. En conversaciones mantenidas con los responsables de urbanismo de varios municipios, éstos han afirmado que la normativa municipal no prohíbe la paja embalada en la construcción, por lo que, cumpliendo las limitaciones urbanísticas que afecten a la construcción en concreto, se puede conseguir la licencia de obras.

Hasta ahora se han analizado los pasos necesarios para poder empezar a construir una vivienda. Distinto es si esa vivienda va a ser para uno mismo o para vender, o la forma en la que se va a financiar la construcción. Según el caso del que se trate, es posible encontrar más o menos dificultades.

La *Ley de Ordenación de la Edificación* exige que las viviendas de nueva construcción estén aseguradas por un período máximo de 10 años frente a posibles defectos de ejecución, salvo que la vivienda no vaya a ser vendida dentro de este período. Si fuese vendida en este período tiempo, debería ser con el consentimiento del nuevo propietario para no contar con dicho seguro. Para que una compañía realice este seguro a una vivienda es necesario que cuente con el apoyo de una *Oficina de Control Técnico* que certifique la calidad de la construcción. Según conversaciones mantenidas con el personal de una de estas oficinas, se sabe que esta labor de certificación es posible en el caso de construcciones con balas de paja siempre que exista una compañía aseguradora que esté dispuesta a realizar dicho seguro. Será la compañía aseguradora la que se encargue de encontrar una OCT que le realice la supervisión del proyecto y de la ejecución.

Alguna de las construcciones que de forma oficial existen en España cuentan con un seguro de hogar, o por lo menos así lo ha asegurado su propietario en conversaciones mantenidas. En respuesta a una consulta realizada a la compañía Seguros Bilbao, sus responsables han contestado que la falta de demanda de un servicio en concreto hace que éste no exista, pero que aún así sería posible realizar un tipo de seguro “a la carta” según la vivienda en cuestión.

Puede darse el caso de que se necesite conseguir un crédito hipotecario para realizar la construcción. En España, y según información de un propietario y de una entidad financiera, se ha dado al menos un caso. *Triodos Bank*, referente en la banca ética en Europa y con presencia en varios países del continente, ha confirmado que ha concedido un préstamo hipotecario para la construcción de una vivienda con balas de paja. Paralelamente, un propietario ha asegurado que ha contado con un crédito hipotecario para la construcción de una vivienda de balas de paja que ha sido valorada por un técnico en 150.000 €. Es muy posible que resultase muy interesante toda la información acerca de una de las viviendas estudiadas, pero sus propietarios consideran que hay información que prefieren no compartir, y su decisión debe ser respetada.

Conseguir un seguro de hogar, al igual que sucede con los préstamos hipotecarios, es algo que entra dentro de la política de la compañía con la que se pretenda contratar este servicio. Son ellos los que deben estudiar el caso y ver los riesgos que pueden existir. De entrada son dos las compañías aseguradoras





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

consultadas, Seguros Bilbao y Seguros Santalucía, las que han confirmado que es posible realizar un seguro de hogar a este tipo de construcciones. En conversaciones mantenidas, y tras una explicación de las propiedades del material y sus posibles riesgos, ambas entidades no han mostrado ningún inconveniente para poder realizar este tipo de servicio.

No hay ninguna normativa en nuestro país que impida explícitamente el uso de este material en obra. El factor positivo es que en la actualidad ya existen algunas viviendas totalmente legalizadas en España (Navarra, Alicante y Cataluña). Aparte de éstas, a fecha de Noviembre de 2006 existen otras dos que no están construidas pero sí cuentan con todos los permisos de construcción¹. La tipología constructiva parece que no importa mucho ya que tanto los sistemas de muros portantes como los que emplean estructura auxiliar han sido legalizados.

Una forma de agilizar los trámites administrativos sería hacer referencia a estas construcciones ya existentes. También es aconsejable incorporar al proyecto los ensayos realizados en países de Europa, que demuestran la viabilidad del material. En España aún no se han realizado ensayos con balas de paja².

13.4.2 Exigencias del Código Técnico de la Edificación

Exigencias de seguridad estructural

En la construcción actual, la gran mayoría de las estructuras se realizan con hormigón armado, aunque también tienen importancia el acero o la madera. Todos éstos son materiales ampliamente experimentados en la construcción, razón por la cual los contemplan las distintas normativas relacionadas con la construcción, como pueden ser la EHE o el CTE. La paja embalada no es, ni por asomo, un material tan experimentado como los anteriores, pero la realidad es que se ha construido con él en muchas partes del mundo y desde hace bastante tiempo. No existe una normativa explícita para la construcción con balas de paja en nuestro país y tampoco se menciona en el Código Técnico de la Edificación. Por otro lado, el CTE deja abierta la posibilidad de incorporar sistemas innovadores, siempre que se demuestre el cumplimiento de las exigencias básicas de dicha normativa en referencia a los elementos constructivos en los que intervienen. El cumplimiento de dichas exigencias se podría demostrar con ensayos como algunos de los realizados en EEUU, Australia o Alemania. Lo que no es posible cumplir a día de hoy es que las balas de paja, como producto de construcción incorporado permanentemente al edificio, tenga el marcado CE.

Para justificar que un edificio cumple las exigencias básicas que se establecen en el CTE se puede optar por adoptar las soluciones técnicas basadas en los Documentos Básicos, u optar por soluciones alternativas. En este último caso, el proyectista o director de la obra pueden, bajo su responsabilidad y previa conformidad del promotor, adoptar soluciones alternativas siempre que sus prestaciones sean, al menos, equivalentes a las que se obtendrían en el caso anterior. Esto abre una puerta a las construcciones con materiales o sistemas alternativos.

El cumplimiento de las exigencias básicas de la normativa debe ser certificado mediante una evaluación técnica favorable de su idoneidad para el uso previsto, concedida por las entidades autorizadas para ello por las Administraciones Públicas competentes. En nuestro país no se han realizado ensayos que

¹ Rikki Nitzkin, experta en la práctica de la construcción con balas de paja

² CONFER – Red de construcción con balas de paja, op. cit.





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

puedan certificar el comportamiento del sistema constructivo de muros con balas de paja, pero existen países en Europa que sí los han realizado, con resultados positivos.

Aparte de las propiedades del producto de construcción a incorporar al edificio, la construcción debe cumplir ciertos requisitos para poseer una aptitud de servicio como si se tratase de cualquier otro sistema constructivo. Tales limitaciones pueden tratar de la flecha relativa en las estructuras horizontales o desplomes de los elementos constructivos. La capacidad de control de la flecha relativa de los forjados queda dentro de la propia configuración del forjado o incluso dentro de la estructura de coronación, cuando se trata de muros portantes. El desplome de los muros se puede evitar o limitar con precompresión de la pared, arriostramientos u otros procedimientos.

Exigencias de salubridad

La sección HS 1 – Protección frente a la humedad, perteneciente al Código Técnico de la Edificación, establece unos criterios para evitar o limitar la cantidad de agua que penetre en el cerramiento exterior de una edificación. Estos criterios son variables en función de la zona pluviométrica o del grado de exposición al viento.

El Código Técnico no contempla explícitamente las balas de paja como elemento constituyente de un sistema constructivo. Por el contrario sí contempla el típico cerramiento multicapa de fábrica de ladrillo. El no reconocimiento de la paja embalada o del sistema constructivo, por parte de la normativa, hace que en principio no cumpla ciertos aspectos como puede ser que el material base del cerramiento no puede ser higroscópico. En la práctica, son las capas de recubrimiento las que se encargan de neutralizar esa característica de permeabilidad de la paja. Por otro lado, sí puede llegar a cumplir otros aspectos como el espesor total de la hoja de cerramiento, la estanqueidad al agua o la permeabilidad al vapor de agua. Los distintos grados de exigencia de estos dos últimos factores pueden ser cumplidos por medio de un tipo u otro de lámina transpirable como la ya mencionadas en capítulos anteriores. La configuración de fachada diseñada con una lámina transpirable en parte de la misma también puede dar solución a la exigencia de tener una lámina impermeable en la base del muro para impedir el ascenso por capilaridad.

Al tratarse el material base de la pared de un material poroso, e incluso un material de recubrimiento poroso, es necesario colocar un zócalo de unos 30 cm. de altura a lo largo de toda la fachada para proteger la fachada de las salpicaduras.

Exigencias básicas de seguridad en caso de incendio

El CTE establece varios niveles de exigencia de resistencia al fuego de diversos elementos constructivos en función de una serie de variables. Estos niveles se encuentran en 60, 90, 120 o 180 minutos de resistencia al fuego (EI). Paralelamente establece los mismos niveles de limitación para la estabilidad ante incendios (R).

Son varios los ensayos que se han realizado para determinar la resistencia al fuego, teniendo como resultado de alguno de ellos una EI de 120 minutos. De este modo estaríamos cumpliendo todas las limitaciones de resistencia al fuego excepto la de los locales de riesgo especial, en los que se exige EI 180. No se tiene constancia hasta la fecha de ningún ensayo realizado con el objetivo de determinar la R de una





CAPÍTULO 13 – ASPECTOS NORMATIVOS

pared de balas de paja. De cualquier modo, esta limitación afecta al caso de medianeras de edificios o al caso de elementos estructurales de los mismos. Si la construcción realizada cuenta con una estructura auxiliar, de modo que las balas funcionen como simple cerramiento, simplemente deben cumplir la limitación de Resistencia al Fuego.

Exigencias básicas de ahorro de energía

El documento básico de ahorro de energía (HS) tiene como objetivo que las construcciones sean más eficientes energéticamente. Para ello marca pautas y establece limitaciones que son variables en función de una serie de zonas climáticas establecidas. En el caso de los cerramientos exteriores, las regulaciones se centran en dos aspectos: limitar la transmitancia y evitar las condensaciones superficiales.

En el caso de Galicia, la transmitancia máxima admisible en las provincias de A Coruña, Lugo y Pontevedra para el material del cerramiento es de $0,95 \text{ Wat./m}^2\text{K}$, mientras que en Ourense esta limitación se establece en $0,86 \text{ Wat./m}^2\text{K}$. En el ensayo realizado en los Oak Ridge National Labs (EEUU) en el año 1998, el resultado de transmitancia para una pared con balas de paja de dos cuerdas colocadas en horizontal y con un recubrimiento de yeso fue de $0,21 \text{ Wat./m}^2\text{K}$, valor que cumple ampliamente la exigencia establecida por el código técnico. Según resultados de ensayos realizados en Austria, la transmitancia de una pared de balas de paja puede incluso llegar a los $0,13 \text{ Wat/m}^2\text{K}$.

Las condensaciones superficiales en los cerramientos que componen la envolvente térmica del edificio se limitan de forma que se evite la formación de mohos en su superficie interior. Para ello, en las superficies interiores de los cerramientos que puedan absorber agua o susceptibles de degradarse, la humedad relativa media mensual en dicha superficie será inferior al 80%. Conseguir no superar este nivel puede ser difícil, sobre todo en zonas como Galicia, que gran parte del año la humedad relativa exterior está en torno al 85% o 90%. Una buena forma de evitar las condensaciones consiste en una correcta ventilación del interior de los locales.



Capítulo 14

ANÁLISIS ECONÓMICO



CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

14.1 Ahorro en ejecución material

14.1.1 Introducción

El coste que supone realizar una construcción con balas de paja es una de las ventajas con las que cuenta el sistema. Prueba de ello son las numerosas iniciativas de construcción de viviendas en zonas con escasos recursos económicos, como ha ocurrido en Estados Unidos o en China ante las pésimas condiciones en las que se encontraban algunas comunidades desfavorecidas. De este modo, la gente puede disfrutar de una vivienda en condiciones y a un coste muy asequible.

A la hora de trabajar con precios, son muchas las variables que influyen en éste, sin contar con las múltiples posibilidades de las que disponemos tanto para construir con balas de paja como para construir con materiales convencionales. En general la construcción con balas de paja, como con cualquier otro sistema, puede tener diversos costes según la configuración de los muros o incluso del resto de los elementos constructivos. Lo que es evidente es que el principal material de estos muros son las balas de paja, y de momento el coste de las balas es reducido. A continuación detallaremos algunas de las causas que pueden influir para que construir una vivienda con balas de paja resulte económico o no.

Coste del material

La paja embalada no entra dentro de lo que se puede llamar un material de construcción caro. De todos modos, en su precio influyen factores como la producción de cereal de ese año, la climatología durante el tiempo de secado del cereal, o incluso el transporte de las balas hasta la futura construcción.

La paja no es el único material que pasa a formar parte de las paredes de estas construcciones. Los recubrimientos que se suelen aplicar a estas paredes suelen ser de mortero mixto y de espesor considerable (2, 3 o 4 centímetros, o incluso más), espesor muy superior al que suelen tener los cerramientos tradicionales.

Empleo de materiales reciclados

Algunas de las personas que construyen con balas de paja, animadas por lo ecológico que resulta este sistema, se deciden a reciclar materiales incorporándolos a su construcción. Éste puede ser el caso de madera de antiguas estructuras sometidas a algún tratamiento e incorporada a la vivienda como estructura o con cualquier otra función. Dejando a un lado la calidad de la construcción, y según los materiales reciclados que utilicemos, reciclando se evitan muchos costes.

Sistema constructivo empleado

Si el tamaño de la vivienda lo permite, suele resultar más barata la construcción si los muros son portantes que si es necesaria una estructura auxiliar. Si la construcción es de muros portantes, es posible que sea necesaria una mayor cantidad de mano de obra, bien sea porque la ejecución de las paredes requiere mayor esmero o porque son necesarias tareas como la de aplicar la precompresión a las paredes.



CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

Mano de obra

Muchas personas que tienen viviendas de balas de paja dicen que resulta muy barato construir una vivienda de este tipo. A mayores de lo económico que resulta el sistema, existe el factor de que muchos propietarios deciden realizar la construcción ellos mismos, si no toda sí parte de ella, prescindiendo de la necesidad de mano de obra especializada. Un porcentaje elevado de las viviendas de balas de paja que existen han sido materializadas por sus propios dueños o por gente que desinteresadamente presta su colaboración para ello. No existen empresas ni muchos trabajadores especializados en este tipo de construcción por lo que son los mismos propietarios, una vez informados acerca del tema, los que se ponen manos a la obra. De ahí viene la escasa calidad constructiva de alguna de estas construcciones.

Al no existir profesionales con el hábito constructivo, los rendimientos que una persona pueda alcanzar construyendo una pared de balas son bajos. Según fuese aumentando la práctica constructiva, los rendimientos irían creciendo a la vez que se mejorarían las técnicas empleadas en la ejecución.

La mano de obra que se necesita en para realizar una pared de balas de paja no suele llegar a equipararse a la de un cerramiento convencional de fábrica de ladrillo, simplemente por el tamaño de las balas que permite cubrir un gran espacio en poco tiempo. Los materiales que se suelen utilizar habitualmente son de formato pequeño, requiriendo gran cantidad de mano de obra.

14.1.2 Coste de la casa piloto del Navajo Project

Con anterioridad hemos hablado del proyecto que se ha realizado en una reserva india de los Estados Unidos que comprendía parte de los estados de Arizona, Nuevo México y Utah. Dicho proyecto consistía en la investigación acerca de viviendas económicas para estas zonas y que además fueran realizadas con materiales y mano de obra de la zona.

Parte de la vivienda estaba construida con balas de paja y otra parte con adobe, obteniendo así un mayor rendimiento energético. La parte de balas de paja estaba construida al estilo “Nebraska” y orientada al norte, mientras que la parte de adobe estaba orientada al sur para un mayor aprovechamiento de la energía solar. La superficie construida de la vivienda fueron unos 92 m² y en la construcción se utilizaron materiales de la zona así como la colaboración de diversas personas que se ofrecieron para realizar el proyecto. El coste total de los materiales ascendió a 36.046 \$ y la mano de obra a 21.000\$, lo que hacía un total de **57.046\$**. En balas de paja se gastaron 1.032\$ y en el material para el adobe fueron 1.575\$. Lógicamente, la mano de obra para realizar los muros de adobe fue muy superior a la de las paredes de balas de paja, siendo la de las paredes de adobe 1.920\$ y la de las balas de paja de 540\$.



Fig. 14.1- Prototipo de vivienda de balas de paja y adobe para el Navajo Project [House of Straw – Straw Bale Construction Comes of Age – U.S. Department of Energy – 1995]

CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

14.1.3 Coste de una vivienda unifamiliar en Navarra

Anteriormente hemos dicho que existen varias casas con balas de paja en España que tienen con todos los permisos necesarios, por lo tanto, cuentan con un proyecto de ejecución. Una de estas viviendas se encuentra en Artaza (Navarra). Es una vivienda pequeña que se desarrolla en planta baja y que tiene una superficie útil de 71,89 m² y una superficie construida de 117 m². Su forma se puede apreciar en este dibujo, que es el que decora la portada del proyecto de la vivienda, pero en los anexos se pueden ver los planos de la vivienda.

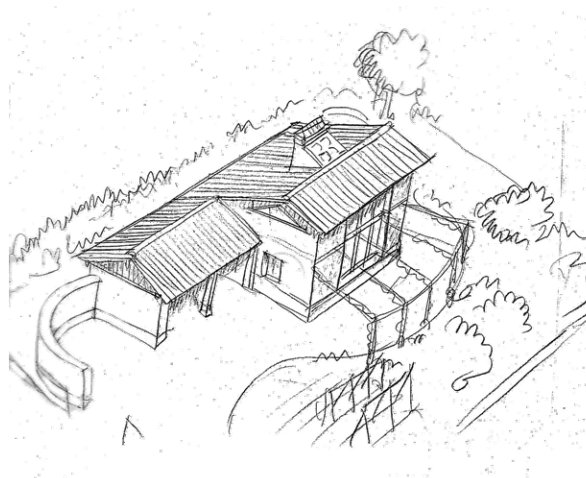


Fig. 14.2- Vivienda unifamiliar de balas de paja en Navarra (Arquitecto: Iñaki Urkía)

El programa de necesidades es mínimo, teniendo un vestíbulo, un salón-comedor-cocina, una despensa, un baño y un dormitorio. La vivienda se ha diseñado según la normativa urbanística de Artaza y el diseño ha sido pensado para que fuera lo más ecológico posible. La pared del salón-comedor-cocina es más alta de lo normal para permitir colocar ventanales amplios en la zona sur y las paredes son de paja (100 x 50 x 35 cm) colocadas en horizontal y con un recubrimiento de mortero mixto. La calefacción de la casa son una cocina económica y un hogar colocados en el centro de la vivienda.

El proyecto incorpora el presupuesto de ejecución material que se resume en los siguientes datos:

RESUMEN DEL PRESUPUESTO	
1. Movimiento de tierras	595,04 €
2. Cimentaciones	5.520,00 €
3. Estructuras	12.235,00 €
4. Albañilería	12.565,00 €
5. Carpintería	3.400,00 €
6. Fontanería	7640,00 €
7. Electricidad	3.720,00 €
8. Pintura	2.850,00 €
9. Seguridad y salud	1.500,00 €
TOTAL P.E.M.	50.055,04 €

Tabla 14.1

A continuación vamos a proceder a determinar el coste de la totalidad del cerramiento para poder compararlo con otro cerramiento de materiales convencionales.



CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

VALORACIÓN			
	SUPERFICIE (m ²)	PRECIO UNITARIO (€/m ²)	IMPORTE (€)
M ² de muro de balas de paja colocada, incluso estacas verticales para montaje	150	12,80	1.920
Tensado y post-compresión de las balas realizado a lo largo de una semana	1	1	1.000
Revoco a buena vista de paramentos de balas de paja	300	11,5	3.400
Lámina Tyvek o similar colocada	150	4	600
COSTE DE EJECUCIÓN DEL CERRAMIENTO			6.920 €

Tabla 14.2

El coste de cada metro cuadrado de cerramiento equivale a **46,13 €/m²**. Ahora vamos a averiguar el precio de ejecución material que tendría un cerramiento de esta superficie y con materiales utilizados comúnmente en construcción. Para elegir la configuración del cerramiento se ha tenido en cuenta que los muros de balas de paja soportan la carga de la cubierta, por lo que el que se elija también la debe soportar. El cerramiento elegido es el siguiente:

Cerramiento formado por fábrica de ladrillo cerámico hueco doble 24x11,5x8 cm., de 1/2 pie de espesor, enfoscado interiormente, con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río tipo M-5, aislamiento térmico mediante espuma rígida de poliuretano fabricada in situ realizado por proyección sobre la cara interior del cerramiento de fachada, con una densidad nominal de 35 kg/m³. y 30 mm. de espesor nominal, cámara de aire de 5 cm. y tabicón de ladrillo cerámico hueco doble 24x11,5x8 cm., recibido con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río tipo M-5. Enfoscado maestreado y fratasado con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río M-10, en paramentos verticales de 20 mm. de espesor.

El coste de este tipo de cerramiento, según los precios de una base de precios de la construcción del año 2006, asciende a **70,95 €/m²**. Si el cerramiento de la vivienda se hiciese según la descripción anterior, el coste total del cerramiento ascendería a 10.642,5 € frente a los 6.920 € que cuesta con las balas de paja. Construir el cerramiento con balas de paja supone un **ahorro del 35%** respecto a una solución convencional de fábrica de ladrillo y espuma de poliuretano. El ahorro sería de **3.722,5 €** lo que supone el 6,92% del presupuesto de ejecución material con cerramiento de fábrica de ladrillo.



14.1.4 Comparación de costes con los de un cerramiento convencional

Para realizar la comparación de los costes de ejecución de un cerramiento de balas de paja con los de un cerramiento convencional se ha estimado necesario que cualquiera de los dos modelos analizados pudiese ser utilizado en la misma construcción, aunque no simultáneamente, sí indiferentemente. Esta es la razón por la que se optó por plantear la construcción de paredes en una vivienda con estructura de hormigón que contase con un cerramiento convencional de fábrica de ladrillo y aislamiento térmico a base de poliestireno extruido.

El proyecto de la vivienda que se va a tomar como base para el estudio es de Febrero de 2005, y dicho inmueble se encuentra en proceso de construcción mientras se redacta este estudio sobre la construcción con balas de paja. En este momento se encuentra con la estructura terminada como se puede ver en las fotografías que aparecen a continuación.

La vivienda cuenta con una planta semisótano, dedicada a garaje y a caldera para calefacción, y una planta baja en la que se encuentran las habitaciones, los cuartos de baño, la cocina y el salón. Además, en la planta baja existen dos porches, uno en la zona norte y otro en la zona sur.



Fig. 14.3- Alzado Sureste



Fig. 14.4- Alzados Sureste y Suroeste

CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

La imagen de la derecha representa la sección vertical del cerramiento de la vivienda según el proyecto. La descripción del cerramiento es la siguiente: “Cerramiento formado por fábrica de ladrillo hueco doble colocado a tabicón $e=8,00$ cm., enfoscado interiormente con mortero de cemento CEM II/A-P 32,5R y arena de río 1/6, aislamiento térmico con planchas de poliestireno extruido de 30 mm. de espesor y 30 kg/m^3 , cámara de aire de 4 cm., formación de canaleta impermeabilizada y hoja exterior de ladrillo hueco doble colocado a tabicón enfoscado exteriormente con mortero de cemento CEM II/A-P 32,5R y arena de río 1/6.”

El comportamiento de esta configuración de materiales está ampliamente comprobado y su ejecución no tiene ningún secreto para los operarios que realizan este tipo de cerramientos día tras día. Hay que decir que el puente térmico que existe en el canto del forjado no estaba previsto en proyecto (tenía una rasilla en el canto), pero en la realidad el canto del forjado está en la vertical con el trasdós del muro de hormigón.

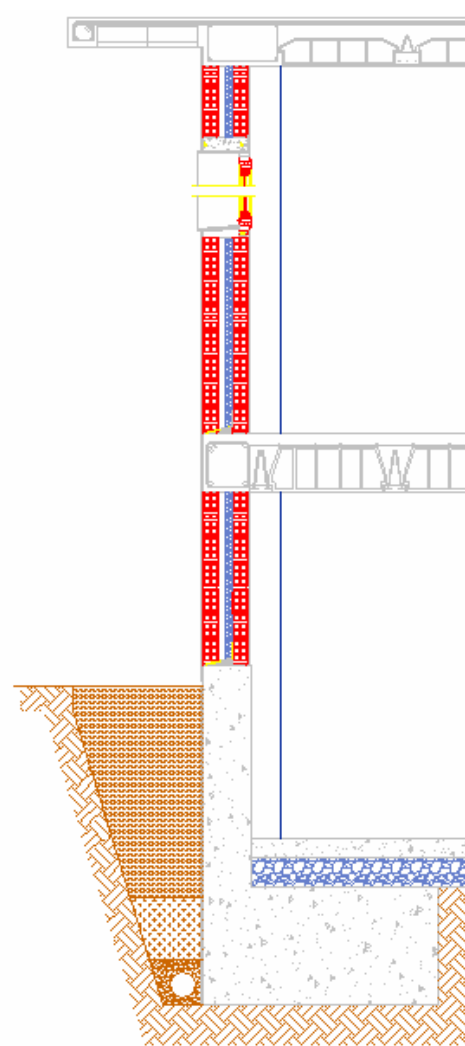


Fig. 14.5- Sección constructiva de proyecto

CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

La imagen de la derecha representa la sección vertical del cerramiento de la vivienda según la propuesta a comparar con el cerramiento de proyecto. La descripción del cerramiento es la siguiente: “M2 de cerramiento de fachada formado por balas de paja colocadas en sentido vertical con solape mínimo de 30 cm., clavadas con listones de madera de pino de 3x3 cm. de sección con 2 listones por bala y fijación cada dos filas, y recubrimientos de 25 mm de espesor de mortero mixto 1:1:6 aplicado en dos capas.”

La estructura de la construcción, tal como está en la actualidad, ya garantiza la seguridad de las balas de paja frente a posibles humedades de capilaridad provenientes del suelo. La planta baja ya está toda elevada del terreno, y el semisótano cuenta con un muro de hormigón escalonado sobre el que se podrían colocar las balas de paja. En esta configuración se ha optado colocar paja suelta en el canto del forjado para eliminar el puente térmico que se presentaba en la solución anterior. Se podría no haber tomado esta decisión poniendo a plomo la cara exterior de las balas con el canto del forjado, de modo que habría que diseñar un sistema de apoyo de las balas del semisótano por la cara interior en su arranque a partir del murete de hormigón.

La colocación de las balas en vertical supone un menor consumo de material y ocupación de espacio que si se colocaran en horizontal. Es la solución por la que se suele optar cuando las balas no tienen que soportar cargas verticales de la estructura. En este caso el espesor total del cerramiento es de 40 cm. frente a los 25 cm. del cerramiento propuesto en proyecto. Esto supone un incremento de espesor de unos 15 cm., incremento que sería menor si el cerramiento de proyecto contase con hoja exterior colocada a $\frac{1}{2}$ pie, como suele ser habitual. Si la hoja exterior de proyecto estuviese colocada a $\frac{1}{2}$ pie, el incremento de espesor sería entonces de unos 11 cm. únicamente. También hay que decir que no todo el incremento de espesor se traduce en una merma del espacio interior. Parte del incremento de espesor se produce hacia el exterior, resultando un incremento de espesor hacia el interior de unos 8 cm.

Según la densidad de las balas, la forma de colocación, el tipo de recubrimiento y su espesor, la altura máxima que se puede alcanzar para que el peso propio no supere la carga máxima admisible es de **9,52 metros**. En nuestro caso, la máxima altura que se alcanza en la planta baja es de **4,7 metros**, y la máxima altura total es de 7,20 metros, en cualquier caso dentro de lo admisible.

Comprobada la cuestión de la altura máxima por peso propio es necesario ocuparse de la limitación de la esbeltez máxima, limitación que es más restrictiva. La planta baja tiene una altura considerable en algunas zonas por lo que es necesario diseñar algún sistema de rigidización del cerramiento. La actual normativa de

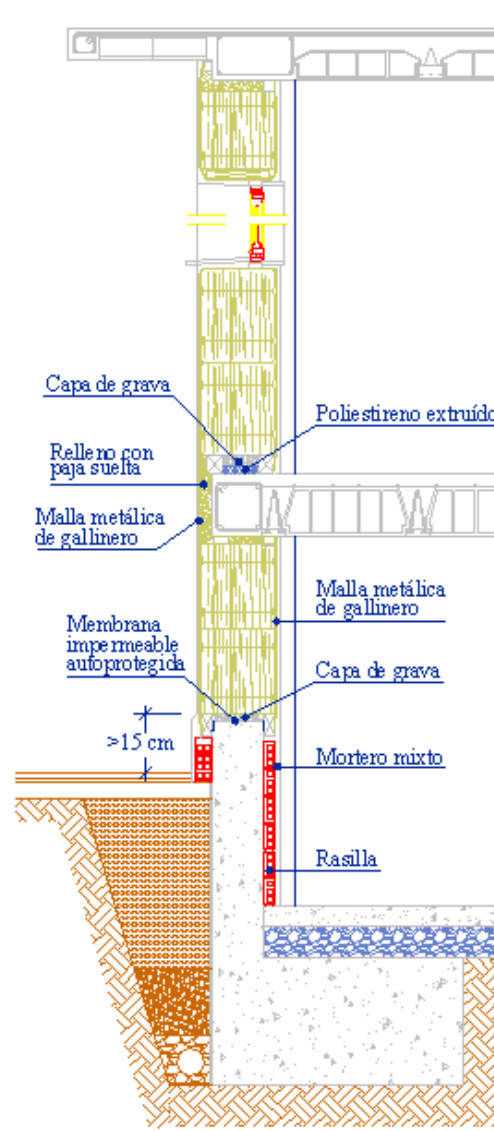


Fig. 14.6- Sección constructiva comparativa

CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

California (*California Straw Bale Code 2002*) limita la relación altura/espesor de una pared de balas de paja a **5,6/1**. Esto supondría que en nuestro caso la altura máxima de pared sin fijación intermedia podría ser **2,24 metros**. El borrador del fuguro *CSBC* limita la esbeltez a 6/1, con lo que la altura podría alcanzar los 2,40 metros.

Sea cual sea el dato que se tome como referencia, lo cierto es que la altura que alcanzan los cerramientos supera el valor máximo recomendado, siendo necesario diseñar algún sistema de rigidización de la pared frente a acciones perpendiculares al plano de ésta. Para ello se propone la siguiente solución.

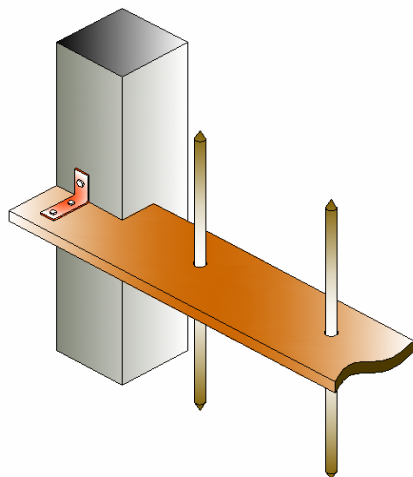


Fig. 14.7- Propuesta de elemento rigidizador de pared frente a esfuerzos de viento

La pieza podría ser de madera o de madera aglomerada con resinas fenólicas, y se colocaría entre soportes y fijados a éstos a la altura de la parte superior de las ventanas (2,10 metros). Serviría de dintel y además para fijar el premarco de los huecos. Debe contar con perforaciones en las que se insertarán listones de madera (2 por bala) para seguir manteniendo la trabazón entre hiladas.

Para eliminar el puente térmico en el canto del forjado se puede optar por realizar el cerramiento continuo por delante de éste. En este caso nos encontramos con la limitación de la altura máxima limitada por el peso propio que pueden soportar las balas. El borrador del CSBC, y también la norma vigente del 2002, establece una limitación de carga de 11,68 kN/m. Teniendo en cuenta una densidad de balas de 110 kg/m³, y el recubrimiento de mortero aplicado, el peso del cerramiento asciende a 128,5 kg/m². Con este peso estamos limitados a una **altura máxima de 9,27 metros**, altura que no se alcanza en esa vivienda.

Por otro lado nos encontramos con que tenemos que fijar el cerramiento al canto del forjado, además de la rigidización correspondiente en la parte alta de las ventanas. Para esta fijación se podría utilizar un sistema como el que se presenta en las figuras 14.9 y

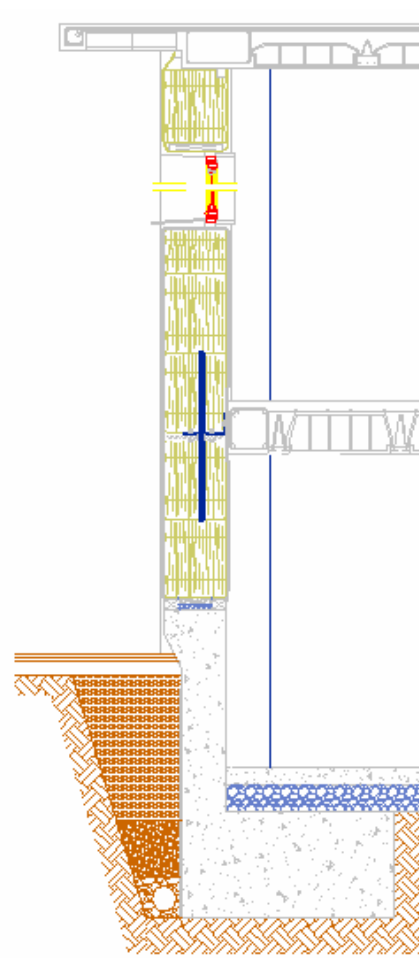


Fig. 14.8- Sección constructiva

CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

14.10. Para realizar esta fijación es necesario hacer coincidir el canto del forjado con una junta entre hileras de balas.

Si suponemos para este caso una superficie de fachada de 58 m², el ahorro en esa fachada en superficie de forjado es de 3m². Esto equivale a un ahorro de 0,052m² de forjado por cada m² de cerramiento. Si al forjado se le supone un coste de 36 €/m², **la parte proporcional de ahorro que le corresponde al cerramiento es de 1,87 €/m² de pared de balas de paja**, actuando más a favor del ahorro en ejecución en comparación con otros sistemas.

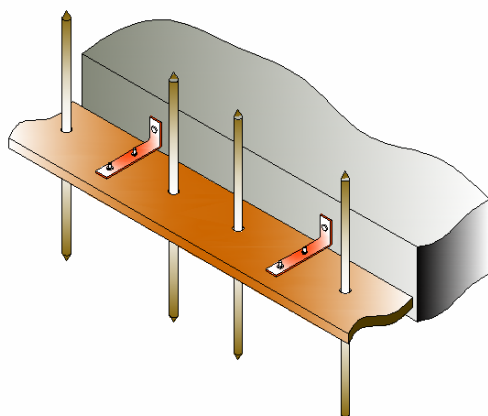


Fig. 14.9- Propuesta de elemento de fijación de la hoja de balas de paja al canto del forjado

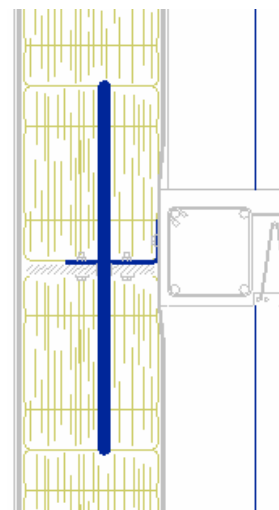


Fig. 14.10- Fijación de la pared al forjado

Coste de ejecución material del cerramiento de proyecto

A continuación se presenta el coste, en Euros, de la ejecución material de este tipo de cerramiento detallando los materiales y la mano de obra utilizada. Para ello se ha utilizado un programa informático ampliamente conocido por los profesionales de la construcción, y se han utilizado los precios de una base de precios muy utilizada, actualizada al año 2006. Los rendimientos del personal que realiza las actividades necesarias para ejecutar el cerramiento son los que se conocen y se utilizan para estos casos.

M2	Cerramiento de dos hojas de LHD a panderete	1,000	49,89	49,89
M3	Mortero de cemento 1/6 M-40	0,044	64,54	2,84
Ud	Unidad ladrillo hueco doble	67,200	0,08	5,38
M2	Poliestireno extruido 30kg/m3 de 30 mm. e.	1,050	7,56	7,94
H	Hora de oficial	1,010	16,17	16,33
H	Hora de peón ordinario	0,978	14,01	13,70

Abonos parc.	Importe/Ud	Porcentaje
Mano de obra	30,03	60,19 %
Maquinaria		
Materiales	16,16	32,39 %
Resto de obra		
Costes indirectos	3,70	7,42 %
Por redondeo		

Tabla 14.3

CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

Coste de la ejecución material del cerramiento con balas de paja

El precio que aparece a continuación es el coste en Euros de la ejecución material del cerramiento de balas de paja propuesto, detallando los materiales y la mano de obra utilizada.

M2	Cerramiento con balas de paja	1,000	33,92	33,92
Ud	Unidad de bala de paja (35x45x100)	2,330	2,00	4,66
M3	M3 de madera de pino para listones de 4x4 cm.	0,004	161,88	0,65
M3	M3 de mortero bastardo 1:1:6	0,053	37,36	1,98
M2	M2 de malla de gallinero	2,200	3,50	7,70
H	Hora de oficial	0,544	16,17	8,80
H	Hora de peón ordinario	0,544	14,01	7,62

Abonos parc.	Importe/Ud.	Porcentaje
Mano de obra	16,42	48,41 %
Maquinaria		
Materiales	14,99	44,19 %
Resto de obra		
Costes indirectos	2,51	7,40 %
Por redondeo		

Tabla 14.4

Estos valores indican que construir un cerramiento de balas de paja supone un **ahorro del 32%** con respecto al cerramiento de proyecto. En el caso de la vivienda estudiada, con una superficie de cerramiento de 252,24 m², el ahorro construyendo con balas de paja asciende a **4.028,27 €**

Como se ha dicho al inicio de este apartado, el precio de la bala de paja, al igual que el de otros muchos materiales, depende de muchos factores. En este caso se ha tomado el coste de las balas de paja que se han utilizado recientemente para la construcción de una pared. El precio del resto de materiales ha sido obtenido de la base de precios antes mencionada.

En el caso de los rendimientos de la mano de obra se han empleado los que existen ya conocidos, a excepción del de la colocación de las balas de paja, del que no existen datos estudiados. Para contar con un dato real de este rendimiento se ha realizado una pequeña muestra de pared como la que se ve en la siguiente imagen.



Fig. 14.11- Muestra realizada para estudiar los tiempos de ejecución



CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

En su ejecución participamos dos personas; uno de nosotros colocaba cada una de las 6 balas mientras la otra persona suministraba el material. A cada bala se le insertaron dos estacas de madera a modo de conector con la fila inferior. Cada bala de paja tiene unas dimensiones de 0,45 metros de alto y 1,00 metros de largo, tal como aparece en la imagen, lo que equivale a una muestra de pared con una superficie total de 2,70 m². El tiempo de ejecución de esta muestra se midió resultando un total de 7 minutos. De este modo, el ritmo de colocación fue de 185 m² cada 8 horas. Si suponemos que este trabajo lo realizan profesionales de la ejecución se puede prever un incremento de rendimiento de un 30%, pudiendo alcanzar los 240 m² cada 8 horas.

14.1.5 Comparación de costes con un cerramiento de iguales prestaciones

La comparación de costes que se va a realizar en este caso es entre el cerramiento de balas de paja descrito en el apartado anterior, y otro de ladrillos y espuma de poliuretano que tenga iguales prestaciones que el de balas de paja. Las características de la pared de balas son las siguientes:

Prestaciones	Valor característico
Coefficiente de transmisión térmica (K) (kcal/m ² h°C)	0,13
Aislamiento acústico (R) (dBA)	44
Resistencia al fuego (RF) (minutos)	120

Tabla 14.5

El coeficiente K es el que se obtiene a partir del valor λ determinado en el ensayo realizado en Austria.

En lo que se refiere al nivel de aislamiento acústico de una pared de balas de paja como la que estamos estudiando, no se tiene conocimiento de ningún ensayo realizado en una pared de características similares. El más parecido es el realizado en el año 2001 en una pared de balas colocadas en vertical y con 40 mm de recubrimiento de barro por cada lado. El espesor total era de 46 cm, 6 más que el de nuestro caso, además de que contaba con mayor masa al tener un recubrimiento de mayor espesor. El nivel de aislamiento acústico de dicha muestra resultó ser de 46 dBA, y a falta de un ensayo más parecido se ha decidido asignarle al caso que estudiamos el valor de R=44 dBA.

La resistencia al fuego de 120 minutos es la que ha dado como resultado una muestra de pared de configuración igual a la que tenemos, ensayada en el año 2006.

El cerramiento con el que se va a comparar tiene las siguientes características:

Prestaciones	Valor característico
Coefficiente de transmisión térmica (K) (kcal/m ² h°C)	0,13
Aislamiento acústico (R) (dBA)	48,7
Resistencia al fuego (RF) (minutos)	240

Tabla 14.6

Este cerramiento tiene un valor K igual al de la pared de paja, a la vez que los demás valores superan a los que poseía la pared a comparar. La configuración que determina estos valores es la siguiente:



CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

Cerramiento formado por dos hojas de fábrica de ladrillo hueco doble, la exterior colocada a medio pie y la interior a tabicón., enfoscado interiormente con 1 cm. de mortero de cemento CEM II/A-P 32,5R y arena de río 1/6, aislamiento térmico con espuma de poliuretano de 14 cm. de espesor, y acabado exterior con mortero monocapa de 1,5 cm. de espesor.

Vemos pues que para alcanzar el grado de aislamiento térmico que tiene una pared de balas de paja es necesaria una configuración de cerramiento como la que vemos. De este modo podemos hacernos una idea visual de lo energéticamente eficientes que pueden resultar las paredes de balas de paja.

El espesor total del cerramiento en este caso alcanza los 41cm., cuando en la pared de balas el espesor total es de 40 cm. Nos encontramos ante una solución de fachada que tiene prácticamente el mismo espesor, el mismo coeficiente de transmisión térmica, prácticamente el mismo grado de aislamiento acústico y mucha más resistencia al fuego. Pese a tener prestaciones bastante parecidas, el coste del metro cuadrado en este caso es muy superior al del metro cuadrado de pared de balas de paja. En este caso el coste era de 33,92 €/m².

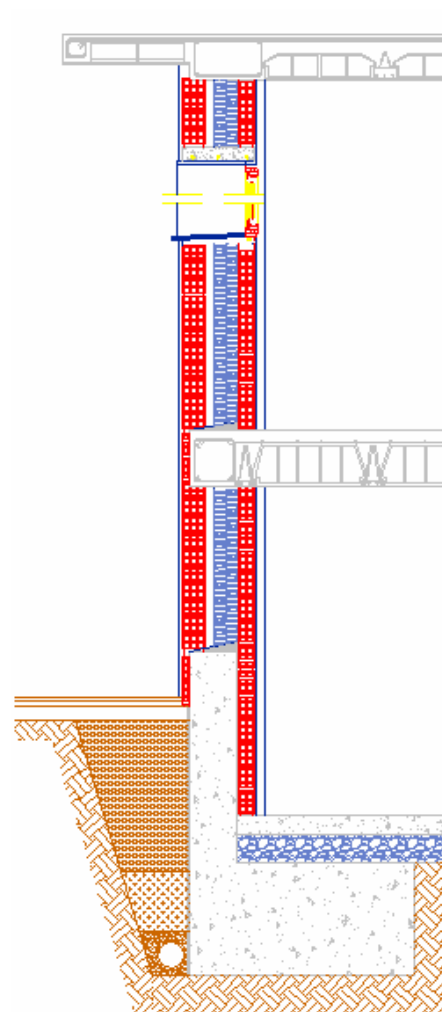


Fig. 14.12- Sección constructiva a comparar

M2	Cerramiento de dos hojas de LHD	1,000	140,31	140,31
M3	Mortero de cemento 1/6 M-40	0,042	64,54	2,71
Ud	Unidad ladrillo hueco doble	83,600	0,08	6,69
M3	Espuma de poliuretano 32kg/m3	0,147	478,20	70,30
H	Hora de oficial	1,284	16,17	20,76
H	Hora de peón ordinario	1,184	14,01	16,59
H	Hora de ayudante	0,250	14,69	3,67
Ahorros parc.	Importe/Ud	Porcentaje		
Mano de obra	41,02	29,24 %		
Maquinaria				
Materiales	88,90	63,36 %		
Resto de obra				
Costes indirectos	10,39	7,41 %		
Por redondeo				

Tabla 14.7

En este caso, el ahorro de las balas de paja frente a este cerramiento es del **76%**. Con balas de paja el coste total del cerramiento serían 8.555,98 € mientras que con según esta configuración serían 35.391,77 €. La diferencia entre uno u otro caso es de **26.835,81 €**

14.1.6 Comparación de costes de la hoja interior de una fachada trasventilada

Una pared de balas de paja con su correspondiente recubrimiento puede servir para ser utilizada como hoja interior de una fachada trasventilada, y como prueba de ello está el edificio S-HOUSE, en Austria. A continuación vamos a comparar los costes de ejecución de los dos ejemplos de fachada, uno de una hoja de balas de paja y otro de una hoja de bloques de termoarcilla, que son los dos cerramientos que se aprecian en la figura 14.13. En ambos casos la hoja interior tiene la suficiente resistencia como para soportar los esfuerzos de viento, por lo que la hoja exterior se puede sustentar mediante simples rastreles fijados a la hoja interior. En el S-HOUSE diseñaron expresamente unos tirafondos especiales para esta sujeción poco común. La fijación de los rastreles se podría hacer

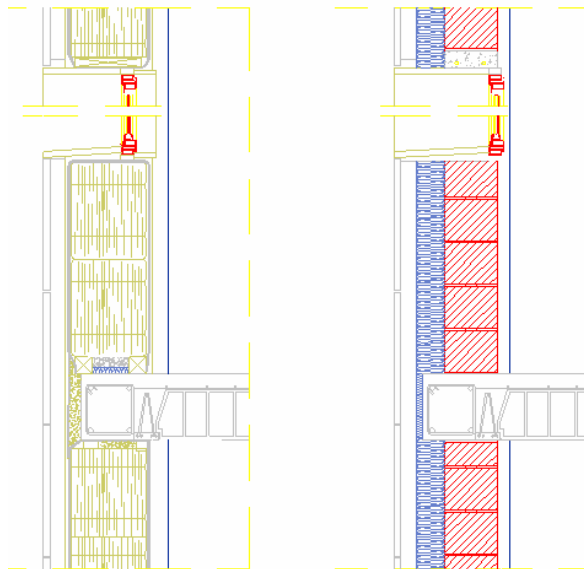


Fig. 14.13- Propuestas de fachada trasventilada para comparar costes

también mediante alambres atados a los elementos longitudinales de conexión entre hiladas de balas. Si este cosido de balas se realiza de forma intensa, se podría prescindir del recubrimiento exterior si se coloca en esta posición una membrana impermeable al agua y permeable al vapor de agua, aunque mermaría mucho la RF del exterior.

Los bloques de termoarcilla tienen un enfoscado interior de 2 cm. de mortero de cemento y el aislamiento exterior es a base de espuma de poliuretano, variando el espesor de éste según el espesor del bloque de termoarcilla para así poder alcanzar el valor de $0,13 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$. Para los espesores de bloque de 14, 19, 24 y 29 cm., los espesores de espuma de poliuretano son 14, 13,5, 13 y 12,5 cm. respectivamente.

A continuación se presentan los costes de ejecución de la hoja interior de ambos tipos de cerramiento, incluso con los distintos espesores de bloques de termoarcilla.

COSTE DE EJECUCIÓN DEL M ² DE CERRAMIENTO				
MATERIAL	ESPESOR (cm)	ESPESOR AISLANTE (cm)	COSTE (€/m ²)	AHORRO CON BALAS
Balas de paja	35	35	33,92	0%
Termoarcilla	14	14	105,51	67,9%
	19	13,5	106,99	68,3%
	24	13	107,17	68,4%
	29	12,5	110,02	69,2%

Tabla 14.8

También se podría diseñar una combinación entre la fachada trasventilada y el muro cortina. La hoja exterior del cerramiento, así como las acciones de viento, estarían soportadas por perfiles verticales fijados a los forjados, de modo que la hoja interior (de balas de paja) estaría exenta de soportar esfuerzos de viento. De

CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

este modo, la pared de balas de paja no necesitaría ser recubierta con malla metálica ni ser intensamente clavada con elementos lineales de madera o metálicos entre filas de balas.

La diferencia de costes entre las fachadas trasventiladas es enorme aunque las soluciones planteadas con termoarcilla no parecen lógicas. De todos modos, una hoja de 29 cm. de termoarcilla con 3 cm. de poliuretano y enfoscado interior alcanza los 53,63 €, mucho más caro que con balas y con peor aislamiento térmico ($k = 0,34 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$). En este caso, el **ahorro** con balas de paja sería del **39%**.

14.1.7 Resumen de la comparación de costes de ejecución de cerramientos

1. Vivienda de balas de paja en Navarra.

En este caso la comparación es entre el cerramiento de balas de paja que posee la vivienda y un cerramiento convencional de fábrica de ladrillo. El de balas de paja supone un ahorro del **35%** respecto al de ladrillo. Esto supondría un ahorro de **3.722,5 €** el **6,92% del P.E.M.**, en caso de sustituir el de ladrillo por el de paja.

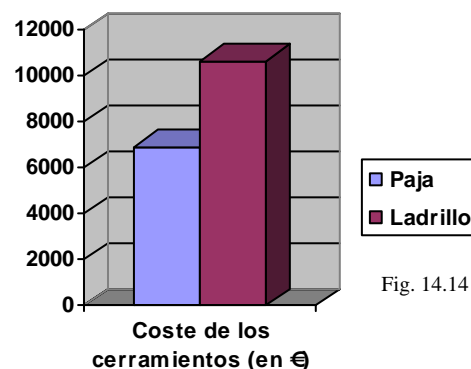


Fig. 14.14

2. Vivienda de estructura de hormigón armado

La comparación, en este caso, se realiza entre el original del proyecto, formado por dos hojas de fábrica de ladrillo, y una propuesta de balas de paja colocadas en vertical. El cerramiento de balas de paja tiene un coste inferior al de ladrillo en un **32%**. Este ahorro alcanzaría los **4.028,27 €**, el **4,53% del P.E.M.**

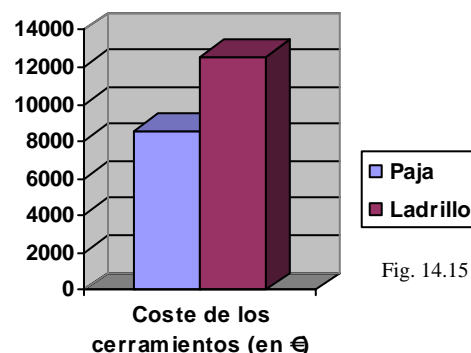


Fig. 14.15

3. Vivienda de estructura de hormigón armado (caso 2)

En este caso la comparación se realizó entre el cerramiento de balas de paja citado en el apartado anterior y un cerramiento de ladrillo y espuma de poliuretano que tuviese un comportamiento térmico, acústico y de resistencia al fuego similar al de balas de paja. El cerramiento de balas de paja supone un ahorro del **76%** frente al de fábrica de ladrillo. La diferencia de costes entre ambos cerramientos supondría un ahorro de **26.835,81 €**, el **23,2% del P.E.M.**, si sustituimos el de ladrillo por el de balas de paja.

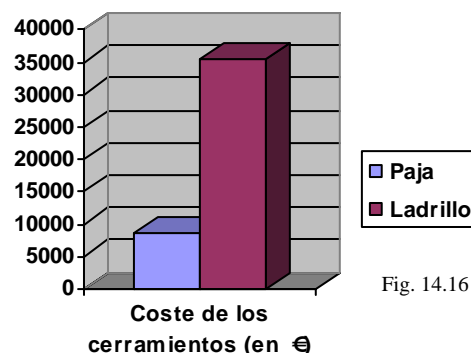


Fig. 14.16



14.1.8 Conclusiones de la comparación de costes

Si hacemos una comparación estrictamente económica entre tipos de cerramientos, los datos reflejan unos datos muy positivos. Tanto en el caso de la vivienda de Navarra como en el de la vivienda de estructura de hormigón armado, la comparación entre tipos de cerramientos refleja diferencias superiores al 30%, lo que supone ahorros considerables en estas partidas. El caso comparativo entre cerramientos de prestaciones equivalentes es un caso aparte porque no es frecuente intentar alcanzar el grado de aislamiento térmico que tiene una pared de balas de paja.

Si el ahorro lo miramos con respecto a la totalidad de la vivienda, éste no suele ser tan significativo ya que tampoco lo suele ser el coste del cerramiento con respecto a la totalidad de la construcción. Esto se aprecia perfectamente bien en el caso de la vivienda de Navarra y el de la de estructura de hormigón armado. La primera es una vivienda pequeña por lo que los cerramientos representan una parte porcentual importante tanto del coste como del volumen. En este caso el ahorro con respecto al P.E.M. es del 6,92%. En el segundo caso nos encontramos ante una vivienda mucho más grande y más compleja, por lo que los cerramientos representan, en porcentaje, una proporción inferior de la totalidad de la construcción. El ahorro respecto al P.E.M. es del 4,53%, valor inferior al de la vivienda de Navarra, pero solo en proporción ya que en dinero supone mayor cantidad.

El caso de la vivienda de balas de paja de Navarra es un ejemplo claro de que se puede construir, sin gastar mucho dinero, una vivienda que puede ser muy confortable. Las comparaciones teóricas entre costes hipotéticos son necesarias, pero la mejor forma de saber los costes de una construcción es analizando un caso real, y la vivienda de Navarra lo es.

La realidad es que, a partir de los datos conocidos, construir con balas de paja no supone un incremento en el gasto de construcción, sino al contrario, a la vez que se obtienen buenas prestaciones. A partir de aquí comienza la libertad para valorar y elegir entre las posibilidades existentes.





14.2 Ahorro energético en calefacción

14.2.1 El consumo de energía en viviendas de balas de paja

14.2.1.1 Introducción

Una ventaja de las paredes de balas de paja es su elevada masa, en relación con los cerramientos convencionales. La masa de la paja y de los recubrimientos necesita horas para calentarse o enfriarse. Este efecto produce ahorro de energía cuando la temperatura exterior es variable. Una casa convencional necesita ser calentada por la noche y por la mañana para evitar el frío hasta que el sol calienta el exterior. Una casa de balas de paja, con la elevada masa térmica, mantiene una temperatura confortable sin necesidad de realizar este calentamiento ocasional¹.

14.2.1.2 Programa de investigación

Aunque las casas de balas de paja tienen una teórica ventaja sobre las casas convencionales, existen pocos datos fiables sobre cómo se comportan realmente. A continuación se presenta una comparación del consumo de energía para calentar hogares de paja y hogares convencionales del mismo tamaño, calidad de construcción y nivel de ocupación. Muchas casas de Canadá utilizan la leña como combustible para la calefacción. Como el consumo de energía utilizando madera es difícil de medir con exactitud, las casas de balas de paja analizadas a continuación utilizaban otro tipo de combustible (gas, electricidad,...). En las casas convencionales utilizadas para hacer la comparación, en lugar de medir el consumo de energía de una forma constante, lo que se hizo fue hacer una estimación del consumo utilizando el software HOT2000, que había sido ampliamente utilizado en Canadá.

Para éste se localizaron 11 casas de balas de paja que utilizaran combustibles que se pudieran medir. Se visitaron las casas, se midieron las superficies de estancias, ventanas y puertas y se revisaron las facturas de combustible. De las facturas se podía extraer la energía utilizada para la calefacción de la vivienda. Utilizando las medidas de esas viviendas se crearon otras ficticias pero con cerramientos exteriores convencionales de doble pared. Todas las dimensiones de planta, ventanas, exposición solar, etc. eran iguales en las reales de paja y en las ficticias. La simulación utilizó ventanas con doble acristalamiento y cámara de aire intermedia a pesar de que las de las casas de balas de paja eran de peor calidad. Se utilizó una frecuencia de 0,2 cambios de aire por hora que, aunque es bajo, es superior al valor que se ha comprobado en viviendas de balas de paja.

¹ Habib John González. Energy Use in Straw Bale Houses [on line]. Ottawa, Ontario, 2002. [Consulta: 27 agosto 2006]. Disponible en web: <<http://www.cmhc-schl.gc.ca>>





CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

14.2.1.3 Conclusiones sobre el consumo energético

Los consumos en calefacción se muestran en la tabla 14.9¹. En las viviendas que utilizaban energía eléctrica para la calefacción se convirtieron los kwh a gigajulios (Gj) para facilitar la tarea de comparación. Las casas de balas de paja utilizaban en torno a un 20% menos de energía que las viviendas modeladas. Parte de esta diferencia puede ser debida a la poca ventilación que presentan las primeras e incluso al margen de seguridad con el que trabaja el software a la hora de predecir el consumo energético en las viviendas convencionales.

Vivienda	Consumo actual (Gj)	Consumo ficticio (Gj)	% consumo real frente a ficticio	Total superficie interior (m ²)	Año de construcción	Tipo de estructura
1	115,6	100,9	+12,7	133	1996	Estr. Aux.
2	52,9	48,6	+8,3	108	1998	Estr. Aux.
3	98,6	103,5	-4,7	156	1998	Estr. Aux.
4	24,6	31,9	-22,8	48	1997	Estr. Aux.
5	96,7	129,7	-25,4	210	2000	Estr. Aux.
6	104,7	129,4	-19,1	189	2001	Estr. Aux.
7	56,4	81,7	-31,0	218	1999	Estr. Aux.
8	152,9	249,5	-38,7	267	1998	Estr. Aux.
9	142,1	186,3	-23,7	209	2000	Estr. Aux.
10	105,7	137,4	-23,1	153	1999	Estr. Aux.
11	73,4	95,7	-23,3	91	1998	Portante
Promedio	93,1	117,7	-21	162		

Tabla 14.9

14.2.2 Comparación de costes con los de un cerramiento convencional

14.2.2.1 Introducción

Una de las principales características de las balas de paja es su eficacia como aislamiento térmico. El aislamiento térmico en zonas que no se caracterizan por tener elevadas temperaturas se traduce en ahorro energético del combustible necesario para la calefacción. A la vez, se reduce la contaminación ambiental si es que los combustibles utilizados para la obtención de energía no son respetuosos con el medio ambiente.

Existen muchas aplicaciones informáticas que son capaces de predecir el comportamiento energético de una vivienda a partir de una serie de datos. Estos programas, en muchos casos sirven para comprobar

¹ Habib John González, op. cit.



CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

varias opciones antes de decidirse por una de modo que para lograr un mismo beneficio se necesite la menor cantidad de recursos energéticos. En este caso se ha optado por realizar el estudio de una vivienda con dos posibles soluciones constructivas de cerramiento de fachada, empleando para ello los programas ARCHISUN y LIDER. La vivienda y las soluciones constructivas de cerramiento utilizadas en este caso, son las mismas que se han analizado anteriormente para determinar el ahorro en ejecución según la opción adoptada.

14.2.2.2 Obtención de los valores de exigencia calorífica mediante software

La vivienda se encuentra situada en las proximidades de Santiago de Compostela, como se puede apreciar en la imagen, y se ha partido de la base de que estará habitada por 4 personas y de forma permanente. Se entiende por permanente que no son frecuentes los largos períodos sin personas en el interior.

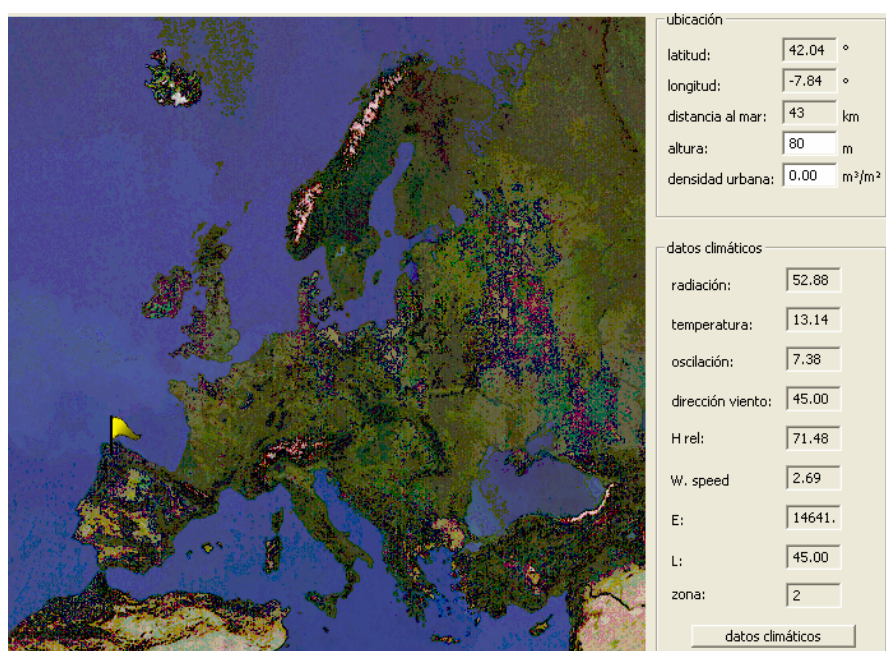


Fig. 14.17- Datos geográficos y climatológicos de la zona en la que se ubica la vivienda a estudiar [Archisun]

Dicha vivienda cuenta con una planta baja y un semisótano, estimando que la calefacción se realizará únicamente en la planta baja. Para simplificar los cálculos, se ha estimado que la planta semisótano no existe. Tampoco se ha contemplado ningún obstáculo que pueda limitar la incidencia de la radiación solar o minimizar el efecto de los vientos sobre la edificación.

Según los datos de proyecto, los valores de los coeficientes de transmisión térmica de los elementos de la envolvente del edificio, y los utilizados para la comparación, son los siguientes:

- Cubierta: 0,48 kcal/m²h°k
- Forjado del suelo de la planta baja: 1,38 kcal/m²h°C
- Cerramientos verticales de fábrica de ladrillo y poliestireno extruido: 0,44 kcal/m²h°C

En la vivienda con el cerramiento de balas de paja, el único valor que se ha modificado es precisamente el coeficiente de transmisión térmica de éste, que pasa a ser 0,13 kcal/m²h°C. Para determinar este valor se ha partido de que la paja tiene un valor $\lambda=0,0456$, según los ensayos realizados en Viena.



CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

ARCHISUN

A continuación se presentan los datos de la simulación de la vivienda. Para comprender los resultados obtenidos es preciso definir la nomenclatura utilizada.

T: Temperatura media de la estación. Expresa la temperatura media interior resultante de las condiciones de la ubicación y del entorno (°C).

dT: Oscilación media diaria de la temperatura en la estación (°C).

R: Radiación solar diaria media de la estación en un plano vertical a sur sin obstrucciones (w/m²).

Hrel: Humedad relativa media de la estación (%).

V sp.: Velocidad media del viento de la estación (m/s).

dV: Dirección predominante en la que sopla el viento en la estación (°).

E: Iluminación total diaria media de la estación en plano horizontal (lux).

L: Nivel de ruido medio de la estación (dBA).

sec.: Secuencia de 14 días de los tres tipos de día, tipo A (despejado), B (medio nublado) y C (medio nublado).

Gtit: Coeficiente indirecto de intercambio térmico por transmisión durante el día. Expresa la potencia enérgica que pasa por los cierres opacos para un grado de diferencia de temperatura interior-exterior y por unidad de volumen del edificio (W/m³C).

fsd: Factor de captación solar directa. Expresa la capacidad captadora de radiación que penetra directamente en el interior. Se da como una superficie teórica equivalente orientada a sur, sin ninguna obstrucción y con un factor de captación igual a 1, en m² de superficie de edificio (m²/m³).

Gtd d: Coeficiente directo de intercambio térmico por transmisión durante el día (W/m³C).

fsi: Factor de captación solar indirecta. Expresa, para la estación considerada, la capacidad captadora de radiación que penetra indirectamente al interior a través de los cierres opacos. Se da como una superficie teórica equivalente orientada a sur sin ninguna obstrucción y con un factor de captación igual a 1 (m²/m³).

Gtd n: Coeficiente directo de intercambio térmico por transmisión durante la noche. Expresa la potencia energética que pasa por los cierres no opacos, para un grado de diferencia de temperatura interior-exterior y por unidad de volumen de edificio (W/m³C).

fln: Factor de luz natural que expresa, para la estación considerada, la proporción (tanto por uno) de superficie interior que se puede suponer iluminada con un nivel suficiente de luz natural

Gv: Coeficiente de intercambio térmico por ventilación. Expresa, para la estación considerada, la potencia energética que representa la entrada de aire exterior, sustituyendo el del interior, para un grado de diferencia de temperatura interior-exterior y por unidad de volumen habitable del edificio (W/m³C).

Mi: Masa térmica interior que expresa, para la estación considerada y por unidad de volumen, la capacidad acumuladora de energía térmica que tiene el interior del edificio, por los ciclos de variación diarios y secuenciales en los que se calcula su comportamiento térmico (Kjoules/m³C).

D: Aportes internos que expresan, para la estación considerada, la energía que se desprende en el interior por diferentes conceptos (metabolismo de las personas, luz artificial, electrodomésticos,...), excluidos los sistemas de control térmico.

Mp: Masa térmica de la piel. Expresa, para la estación considerada y por unidad de volumen del edificio, la capacidad acumuladora de energía térmica que tiene su envoltura, por los ciclos de variación, diarios y secuenciales, en los que se calcula su comportamiento térmico (Kjoules/m³C).

Ti: Temperatura interior. Expresa, para la estación considerada, la temperatura media interior resultante de las condiciones del clima exterior y de las características térmicas del edificio (°C).

dTi: Oscilación media diaria de la temperatura interior en la estación (°C).

Eln: Iluminación media equivalente con luz natural que se genera en el interior sobre un plano horizontal a 0,8 metros del suelo, como promedio diurno (lux).

Li: Nivel medio de ruido interior producido por la penetración a través de los cierres del nivel de ruido exterior considerado (dBA).





CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

Datos climatológicos para la vivienda estudiada



Fig. 14.18

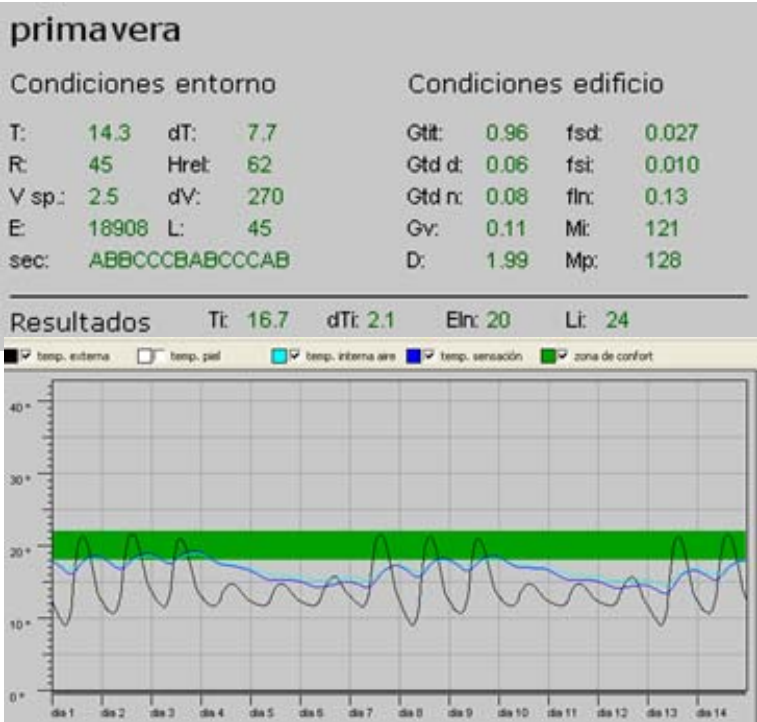


Fig. 14.19





CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO



Fig. 14.20

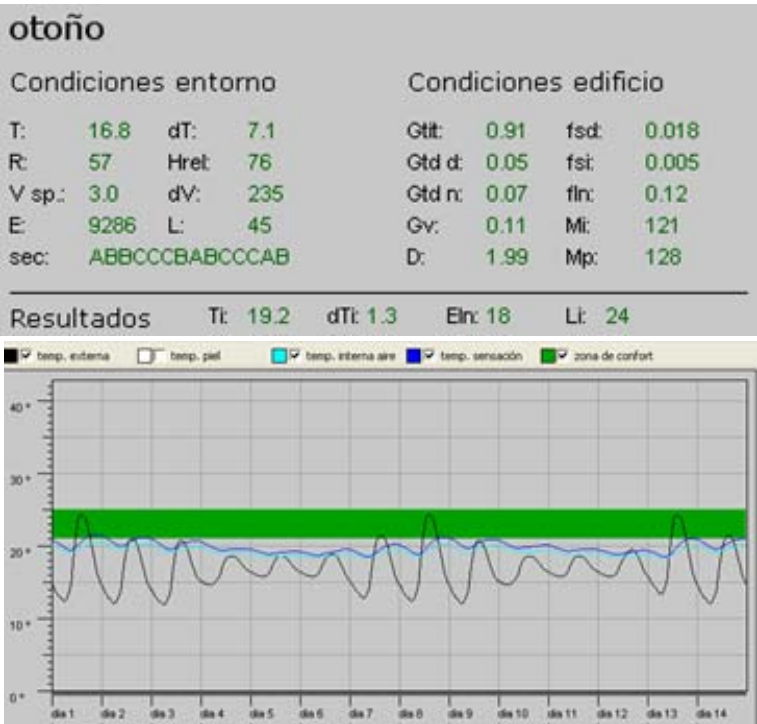


Fig. 14.21



CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

Además de todos los datos que se acaban de mostrar, el programa informático estableció la futura demanda energética para la vivienda, demanda que se distribuye como refleja la figura 14.22. La mayor parte de la energía es requerida para la calefacción, y en el caso del cerramiento de proyecto se estableció una posible demanda de 42,03 kwh/m³ año, lo que equivale a un consumo de **18.787,4 kwh** al final del año.

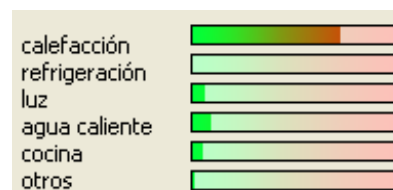


Fig. 14.22- Esquema del reparto de la demanda energética

En el caso de la vivienda con el cerramiento ton balas de paja, los porcentajes de demanda de energía para los distintos usos resultaron ser bastante parecidos a los de la vivienda con el cerramiento convencional. No obstante, se apreció una reducción de la demanda de energía para calefacción, siendo en este caso de 33,17 kwh/m³ año, lo que significa un consumo al final del año de **14.826,99 kwh**. La reducción ha sido del **21,1%** del consumo energético, en este caso electricidad ya que los cálculos se hicieron teniendo en cuenta este tipo de energía.

LIDER

El caso mencionado anteriormente se ha analizado también con el programa LIDER del Código Técnico de la edificación. Este software realiza una comparación entre el edificio a estudiar y uno de referencia, para determinar si cumple con las exigencias del código técnico de la edificación. En nuestro caso, esta comparación con el edificio de referencia se hizo para cada uno de los dos tipos de edificios que estamos estudiando, uno con cerramiento de fábrica de ladrillo, y otro con balas de paja. Los resultados son los siguientes:

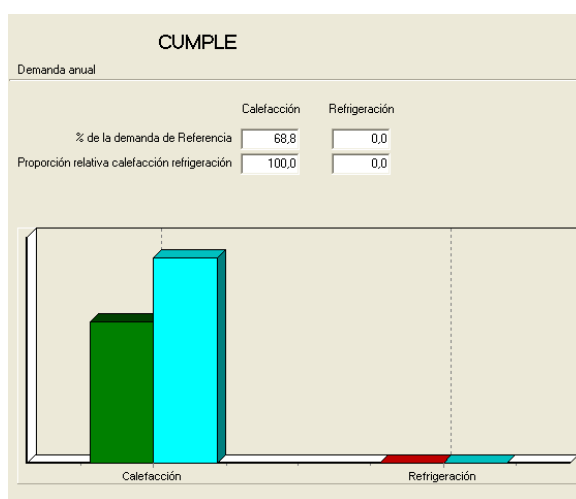


Fig. 14.23- Cerramiento de fábrica de ladrillo

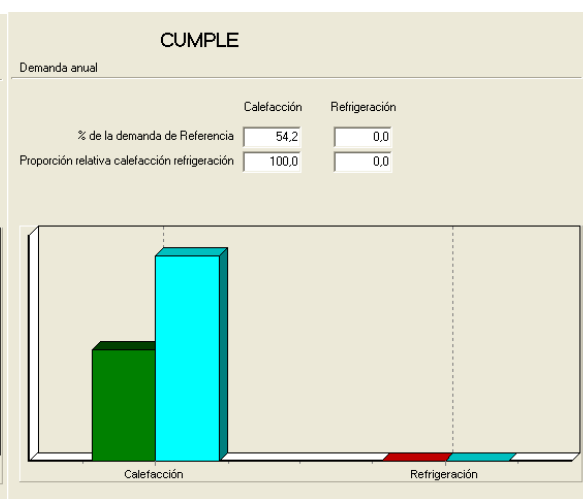


Fig. 14.24- Cerramiento de balas de paja

Según este programa, el requerimiento energético del edificio es inferior en ambos casos al edificio de referencia. Con el cerramiento de proyecto, el consumo de energía en calefacción es el 68,8% del máximo



CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

permitido, mientras que en el caso de las balas de paja es el 54,2%. Los datos reflejan que ambas situaciones cumplen con la limitación, pero además indican que con el cerramiento de balas de paja se consume un **21,2%** menos de energía para calefacción que con el cerramiento convencional.

14.2.2.3 Conclusiones de la comparativa entre cerramientos

Los datos indican que, en el caso de la vivienda estudiada, se puede reducir el consumo eléctrico anual de la calefacción de los **18.787,4 kwh** hasta los **14.826,99 kwh**. Si tenemos en cuenta los datos publicados por el Ministerio de Industria, turismo y comercio a finales del año 2006 acerca de la tarifa de la energía eléctrica, el coste del kwh en la tarifa general era de 0,088179€. Con este precio podemos estar reduciendo la factura anual de la calefacción de los **1.656,7 €** a los **1.307,4 €** con un ahorro de **349,3 €/año**.

Este dato no es definitivo en el ahorro de dinero que se puede conseguir en la calefacción. Para ello influyen otros factores como el tipo de contrato establecido con la compañía suministradora de energía o una buena utilización de la calefacción según los horarios recomendados. De todos modos, a igualdad de condiciones, los cerramientos de balas de paja reducen las pérdidas por transmisión térmica, reduciendo con ello la energía consumida para calefactar nuestro hogar.

14.3 Conclusiones del análisis económico

Como ya se ha dicho anteriormente, son muchos los factores que influyen en los costes de ejecución de una vivienda y analizar todas las variables es absolutamente imposible. No obstante, hemos visto alguna comparativa de costes de ejecución entre distintas soluciones, y en todas ellas resultaba más económica la opción con balas de paja. Uno de los factores que causan esto es la cantidad de mano de obra que se necesita. Las balas tienen un tamaño considerable, por lo que levantar un muro con balas resulta mucho más rápido que hacerlo con ladrillos. Otro factor es el reducido coste del material base, o sea, la paja embalada.

Hemos visto que si comparamos un muro de balas de paja con uno convencional de fábrica de ladrillo o incluso con uno de termoarcilla, el ahorro en los costes de ejecución está en torno al 35%. Si esta comparación se hace entre cerramientos con iguales prestaciones térmicas, entonces el nivel de ahorro se incrementa hasta superar el 70%.

En cuanto al ahorro en el consumo energético, los datos analizados anteriormente reflejan una buena eficiencia energética de las viviendas de balas de paja. Los casos estudiados muestran un ahorro del 21% en el consumo energético de calefacción, lo cual es un dato esperanzador. Este grado de ahorro energético se alcanzó con el simple factor diferencial del material de los cerramientos de fachada. La transmisión térmica en una vivienda, además de por las fachadas, se realiza por los suelos y por la cubierta. Resultaría interesante poder comprobar el grado de eficiencia energética que alcanzaría una vivienda si ésta incorporase balas de paja en estas superficies.

Los datos indican que, en general, la construcción con balas de paja es rentable en la fase de construcción, además de serlo también a posteriori, gracias al ahorro energético. Si tomamos como ejemplo el caso de la vivienda estudiada (la vivienda de estructura de hormigón armado), el coste de ejecución se podría reducir en unos 4.000 € y el consumo energético en unos 350 €/año. Tomando como referencia estos





CAPÍTULO 14 – ANÁLISIS ECONÓMICO

valores, y tras un período de 12 años, el ahorro económico de la vivienda podría alcanzar los 8.200 €, simplemente cambiando el tipo de cerramiento de la vivienda.

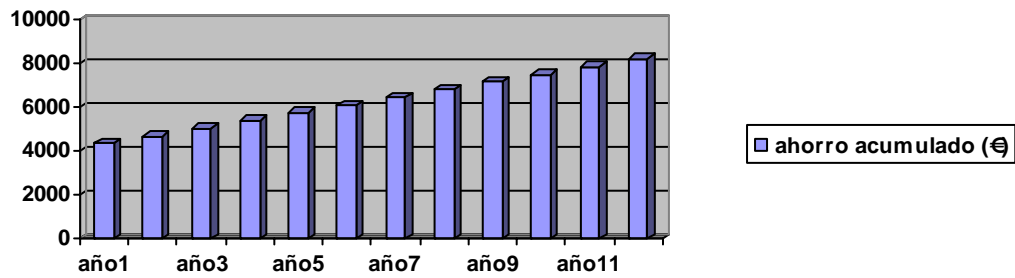


Fig. 14.25



Capítulo 15

RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES



CAPÍTULO 15 – RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

15.1 Recapitulación

El tema que se está tratando en este estudio está experimentando en la actualidad continuos avances en lo que a investigación se refiere, por lo que es muy posible que existan estudios con datos y conclusiones importantes que no se han tenido en cuenta. A pesar de esto, la información que se ha tratado hasta este punto ofrece una visión bastante amplia y detallada de las propiedades de la paja embalada y del comportamiento de las construcciones que la emplean. Esta amplitud de información alcanza tanto a aspectos históricos como técnicos o normativos, procediendo a continuación a realizar una recapitulación con lo más destacable.

Los distintos tipos de paja que podemos utilizar en la construcción son un recurso renovable que se siega en el campo y se somete a un proceso de embalado para que adquiriera unas determinadas propiedades. La paja es biodegradable, por lo que la presencia de humedad puede acelerar el proceso de descomposición de la misma. La producción de cereales en algunas partes del mundo es muy elevada, convirtiéndose en un problema el tratamiento de la toda la paja que resulta de este cultivo. Según la zona, se utiliza para abonar los campos, para realizar el lecho de los animales, como alimento para éstos o incluso se quema. Cuando la quema se produce a muy gran escala se puede dar lugar a un grave problema de contaminación, como ocurría en Estados Unidos antes de que se plantearan la necesidad de crear una ley que limitara esta práctica.

Las balas de paja se pueden utilizar para realizar las paredes de algunas construcciones. Esto es posible desde que en 1850 se inventó en EEUU la primera embaladora mecánica. Aún así, la utilización de las balas en la construcción no empezó hasta finales del siglo XIX con la llegada de los colonos Europeos a tierras Norteamericanas. En Europa se construyó la primera casa con balas de paja en el año 1921, en Francia, y de ahí se fue extendiendo poco a poco a otros países del continente. Es en el último cuarto del siglo XX cuando surge un renacimiento de la construcción con balas de paja, empiezan a aparecer asociaciones por todo el mundo y los estudios, ensayos y publicaciones acerca de este tipo de construcción empiezan a proliferar.

El resurgir de la construcción con balas de paja a finales del siglo XX no es casual. Se produce en una época en la que las sociedades empiezan a tomar conciencia del elevado consumo energético y la contaminación ambiental que se produce en la mayor parte de los países industrializados. En este momento empieza a tomarse conciencia de temas como la construcción basada en criterios de sostenibilidad o de construcción ecológica, y los estudios acerca de la arquitectura bioclimática empiezan a estar a la orden del día. Las buenas cualidades que de por sí tiene la paja embalada se optimizan con el cumplimiento de los criterios que caracterizan a la arquitectura bioclimática.

En esta época, a finales del siglo XX, se tiene conocimiento de la práctica constructiva con un material de coste muy reducido (llegando a ser nulo) y de buenas prestaciones térmicas. La simple combinación de estos dos factores bastó para que comenzaran a desarrollarse proyectos para la construcción de viviendas en zonas con escasos recursos económicos, y castigadas por una climatología dura. Este ha sido el caso de alguna reserva india de los Estados Unidos o de alguna comunidad rural de China.

Son muchas las ventajas que tiene la construcción con balas de paja, aunque también existen inconvenientes. De todos modos, las investigaciones que se han estado realizando a lo largo de estos últimos años han servido para demostrar que algunos de los aspectos, que a priori podían parecer inconvenientes como la resistencia al fuego, al final no resultasen tan problemáticos como se pensaba.





CAPÍTULO 15 – RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

Son muchos los ensayos de resistencia a compresión realizados en balas de paja con y sin recubrimiento. De ellos se extrae que son capaces de resistir grandes cargas aunque a costa de sufrir ciertas deformaciones. Ésta es la principal limitación a la hora de construir con balas de paja: la deformación vertical ante la aplicación de las cargas. Son los ensayos los que también demuestran que las paredes realizadas con mallas metálicas y morteros de recubrimiento en las superficies exteriores pueden soportar las acciones de viento o incluso de los impactos que puedan provocar los objetos desplazados a causa de un tornado. También está comprobado el buen comportamiento de estas paredes ante acciones sísmicas cuando la ejecución se realiza de forma adecuada. La arquitecta Estadounidense Kelly Lerner ha desarrollado sistemas de ejecución especiales para paredes en zonas sísmicas y lo ha puesto en práctica en regiones de China.

Reflejar con datos el comportamiento térmico de las paredes de balas de paja no es nada sencillo. Por un lado son varias las posibles técnicas a emplear para determinar este comportamiento, y por otro lado el material, aparte de ser heterogéneo, puede variar de unas zonas a otras. Estas cuestiones son las que causan la disparidad en los resultados de la transmisión térmica. A pesar de ello no se puede negar lo evidente, que es un comportamiento térmico mejor que los cerramientos convencionales que se utilizan en las viviendas. Además de suponer un ahorro en el coste del material de aislamiento térmico, supone un ahorro en los consumos de la calefacción, ahorro que en algunos estudios se ha cifrado en el 21%.

La paja embalada es permeable al vapor de agua y por tanto también lo es una pared de balas de paja. Además, la estructura interna de la paja le permite almacenar las moléculas del vapor de agua del aire en los microporos que tiene. Este almacenamiento de humedad permite que la paja, estando en condiciones de humedad razonables y durante un tiempo no excesivo, no sufra alteraciones que causen un principio de descomposición. Este comportamiento es el que hace que las condensaciones intersticiales que se puedan llegar a producir no lleguen a causar el deterioro del material. Mantener un equilibrio en los períodos de humectación y secado es lo que asegura la durabilidad de la paja en un ambiente húmedo. El secado se puede producir tanto al exterior como al interior, por lo que están desaconsejadas todas las barreras de vapor. También es muy importante prestar mucha atención al material de recubrimiento, material que debe asegurar la permeabilidad al vapor de agua. El caso más extremo en cuanto a humedad se refiere se produce en los locales húmedos, que necesitan ser controlados de forma intensa para evitar el contacto del agua con la paja y reducir la humedad relativa por medio de ventilación. Se han realizado ensayos para determinar el comportamiento de la paja en condiciones de humedad y han determinado que el punto crítico se produce cuando la paja se satura de humedad, situación que se produce con un contenido de humedad del 40% del peso seco. Este valor, junto con un factor de seguridad, es el que hace que se desaconseje el empleo en la construcción de balas de paja con un contenido de humedad superior al 25%.

La preocupación por el estado de las balas de paja en las paredes ha motivado que en Canadá se estén desarrollando sensores higrométricos específicos para este tipo de situaciones. También han llevado a cabo estudios de campo inspeccionando el estado de las balas de paja en varias construcciones y en la mayor parte de los casos con problemas se encontraron con la misma situación: proceso de putrefacción de las balas inferiores por ascenso de agua por capilaridad. También hay que decir que cuentan con muchas construcciones en buen estado, a pesar del duro clima que tienen en algunas zonas, como por ejemplo en Toronto. Un ejemplo de las construcciones que no presentan problemas es la bodega de la que están siendo





CAPÍTULO 15 – RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

monitorizados los valores de temperatura y humedad relativa. A partir de esos datos se puede ver cómo la climatología influye en el comportamiento de la paja embalada.

El comportamiento acústico de las paredes de balas de paja es bueno. Los ensayos han mostrado valores de atenuación acústica comprendidos entre los 46 y los 60 dBA. Además, si la paja quedase a la vista, que no es lo normal, incluso podría servir como absorbente acústico.

La resistencia al fuego de las paredes de balas de paja es una de las preocupaciones más extendidas. Es cierto que se han dado casos de incendios, aunque éstos no suelen ser incendios devastadores. Se han realizado pruebas de laboratorio para determinar la resistencia al fuego de las paredes de balas de paja con sus correspondientes recubrimientos y se ha llegado a alcanzar resistencias del orden de los 120 minutos.

En cuanto a la ejecución, hay mucho escrito acerca del proceso de construcción con balas de paja o de las técnicas constructivas que se pueden emplear. No obstante, las técnicas deben ser perfeccionadas a base de practicarlas y solucionar las dificultades encontradas. La técnica originaria es la de muros de carga, también llamada “Nebraska”, y posteriormente apareció la que emplea una estructura auxiliar, también llamada “Santa Fe”. A partir de aquí surgen variaciones según el ingenio de los proyectistas o de los constructores, variaciones como la que ha desarrollado Ismael Caballero que consiste en sumergir las balas de paja en un baño de pasta de cal antes de colocarlas en la pared. Cada técnica tiene sus ventajas y sus inconvenientes. También se han diseñado diversos métodos para realizar la trabazón de las balas de una hilera con las de otra o para aplicar la energía necesaria para la precompresión. En cuanto a la cimentación de los muros también existen varias soluciones utilizadas, entre la que se puede destacar por su originalidad la de neumáticos rellenos con piedras.

La creación de los huecos de puertas o ventanas supone una alteración en el proceso de colocación de las balas. Existen procedimientos que han sido utilizados en construcciones pero aún existen muchas posibilidades por descubrir.

El acabado de los paramentos es una tarea de mucha importancia que se puede hacer con o sin emplear una malla metálica o de otro material, aunque la mayor parte de las veces se utiliza algún tipo de malla. Lo que tiene mayor importancia es el material de recubrimiento, que debe permitir la permeabilidad al vapor de agua que pueda haber en el interior de la pared. En el capítulo correspondiente se hizo la propuesta de la utilización en el recubrimiento de una lámina impermeable al agua y permeable al vapor de agua, así como la propuesta de unos módulos preformados de bala de paja con recubrimiento y lámina incorporada, listos para colocar en obra. Otra forma de limitar la cantidad de agua de lluvia que pueda incidir en la pared es con la realización de estucos o con la aplicación superficial de productos hidrofugantes.

La solución de cubierta a adoptar depende en gran medida del sistema constructivo empleado en la construcción. Hay que tener en consideración si las balas de paja soportan carga o no, y si la soportan, en qué condiciones no hacen. El empleo de paja como aislante térmico en las cubiertas también se ha dado en alguna ocasión, aunque no está muy documentado ni estudiado. Esto serviría para complementar el ahorro energético de calefacción que proporcionan las paredes. La solución a adoptar para los suelos también se debe estudiar según el caso, pero son variados y pueden ir desde una solera convencional hasta la propuesta de forjado sanitario con balas de paja entre las viguetas de madera.





CAPÍTULO 15 – RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

En lo que al aspecto normativo se refiere, se ha podido comprobar que son varios los Estados de Estados Unidos que cuentan con una normativa de balas de paja para la construcción. Fuera del continente Americano existen dos países que también cuentan con un documento normativo de estas características y son Bielorrusia y Alemania. Son muchas las construcciones realizadas por todo el mundo, aunque los países que cuentan con un número mayor de éstas son Estados Unidos y China. En los Estados Unidos, y debido a lo extendidas que están estas construcciones, es muy frecuente que los propietarios aseguren sus viviendas sin mayor complicación, y no como ocurre en otros países con menos historia en la construcción de viviendas de balas de paja. En España se sabe que existen algunas viviendas construidas y que incluso algunas de ellas están aseguradas.

En el coste de la construcción son varios los factores que influyen. Los materiales y la mano de obra son los costes inmediatos que tiene una construcción. En el caso de las construcciones de viviendas que se realizan en zonas pobres el coste es reducido porque los materiales son baratos además de que se utilizan los de la zona. Por otro lado, la mano de obra utilizada es en gran medida de personas que prestan su colaboración desinteresadamente. El ahorro en la ejecución material de las paredes depende de la solución con la que se compare el muro de balas de paja. Si se compara con un cerramiento convencional como los que se han analizado anteriormente, el ahorro puede superar el 30%, el cual es un ahorro considerable.

El comportamiento térmico de las paredes de balas de paja en una vivienda es bueno. Por un lado está el grueso recubrimiento interior que posee cierta inercia térmica, mientras que el núcleo de balas de paja proporciona aislamiento térmico. En un estudio realizado en Canadá con el objetivo de determinar el ahorro energético de las viviendas de balas de paja frente a otras convencionales, se determinó que el promedio de ahorro resultaba del 21% en la energía utilizada para la calefacción. Por otro lado, el estudio comparativo de dos posibles tipos de cerramiento en una vivienda realizado con los programas ARCHISUN y LIDER mostró un ahorro energético del 21% en el consumo de calefacción.

15.2 Conclusiones generales

Este documento comenzaba con la siguiente pregunta: ¿Es posible construir con balas de paja? Es evidente que los estudios analizados, los gráficos, las tablas, los ensayos, y sobre todo los ejemplos han servido como respuesta a esa pregunta inicial. La realidad es que se construye con balas de paja, se construye mucho, en muchas partes del mundo y la previsión es que esto siga en evolución.

La variedad en las características de las viviendas que existen es mucha, pasando de cuatro paredes con una cubierta plana a edificaciones de dos plantas de altura con fachada trasventilada. La variedad también está presente en los climas en los que se construyen estas edificaciones, ya que existen en zonas muy frías húmedas pero también en zonas cálidas y secas. Se puede pensar que en una zona como Galicia no se pueden hacer construcciones con balas de paja debido al clima húmedo que tenemos. Es posible, pero es posible que esto mismo hayan pensado los habitantes de regiones de Canadá, como puede ser el caso de Toronto, antes de haber materializado la primera construcción. Poseen un clima más húmedo que el de Galicia y un invierno muy duro, pero sin embargo tienen construcciones de balas de paja que no presentan problema alguno de deterioro.





CAPÍTULO 15 – RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

Para una buena conservación de las paredes es necesario protegerlas de cualquier tipo de agua, pero sobre todo de la lluvia que incide en las paredes y de la que pueda ascender por capilaridad a partir del terreno. Un buen recubrimiento, y sobre todo una buena base del muro, son fundamentales para permitir que la paja no sufra un proceso de descomposición. El agua de las condensaciones también se debe controlar, aunque no suele causar tantos problemas como los dos factores antes mencionados. El vapor de agua suele migrar del interior al exterior a través de los cerramientos. Para que en este proceso no se produzcan condensaciones, o que si se producen éstas sean mínimas, es muy importante un control de la humedad relativa del interior de la vivienda, muy especialmente en el caso de locales húmedos. La ventilación de los espacios para reducir la humedad relativa interior adquiere una importancia crucial.

El beneficio de una construcción con balas de paja es máximo cuando se realiza en una zona fría. El aislamiento térmico es una de las cualidades más importantes de la paja embalada, produciendo un confort interior elevado a la vez que se reducen las pérdidas caloríficas a través de las paredes o del elemento en el que se haya colocado la paja.

Construir con balas de paja puede resultar más económico que con cualquier otro material convencional, aunque depende de la calidad de los materiales con los que se compare o de las soluciones constructivas adoptadas o comparadas. El ahorro se transforma en importante si se compara con cerramientos que cuenten con calidades importantes de acabado, soluciones complejas o incluso cerramientos que se equiparen a los de balas de paja en prestaciones térmicas. Otra ventaja que tiene es que se puede prescindir de una estructura auxiliar haciendo que los muros soporten las cargas. Lo más normal es que esta ventaja se produzca en viviendas de escasa complejidad, no mucha superficie y una sola planta.

Si los muros tienen que soportar cargas, es muy importante ejecutarlos con mucho cuidado y alcanzar un nivel adecuado de precompresión de las paredes. Hay que recordar que las paredes de paja embalada pueden resistir cargas elevadas aunque también pueden experimentar unas deformaciones considerables. Si se consigue que la pared se deforme antes de entrar en servicio, las deformaciones no existirán, o serán mínimas, una vez terminada la estructura.

Construir con balas de paja no es algo que mucha gente haya hecho. Cuando se realizan cosas, los errores pueden estar presentes, y más cuando se trata de algo desconocido. Por eso es muy importante que cuando se construya con balas de paja se haga con el mayor esmero posible. No existe ese hábito que se adquiere en las tareas cuando algo se ha estado haciendo durante muchos años de una forma determinada. Por otro lado puede ser una ventaja porque el hábito da pie a que las cosas se hagan por rutina sin pensar, pudiendo dar lugar con frecuencia a errores.

Es importante destacar la utilización que se le está dando a la paja embalada para realizar construcciones en zonas con escasos recursos económicos y con climatologías adversas. Con este tipo de construcción se presenta una buena oportunidad de facilitar un hogar a personas que lo necesiten. El bajo coste del material se une con el confort interior y con el ahorro energético. Suelen ser zonas en las que grandes comunidades de vecinos se reúnen para llevar a cabo tareas y utilizan materiales locales para las mismas.

Se puede decir que ha sido en los últimos 30 años cuando se ha producido un cierto interés por el estudio y la práctica de la construcción con balas de paja. Aún así, sigue siendo una tipología constructiva





CAPÍTULO 15 – RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

poco conocida y es posible que lo siga siendo durante bastantes años. No obstante, y ahora expreso mi opinión personal, pienso que los estudios, análisis y conclusiones para determinar o mejorar su comportamiento y descubrir nuevas técnicas constructivas seguirán evolucionando, a la vez que seguirá en aumento el número de construcciones realizadas. No parece lógico pensar que las construcciones con balas de paja sean adecuadas para los núcleos de las ciudades por las características que estos poseen, pero sí que podría llegar a ser en cierto modo frecuente en el campo. Es posible que aún sea temprano para saber si esto va a ser así, pero en cualquier caso habrá que esperar para ver cual es la aceptación que tienen las viviendas construidas con balas de paja por parte de las sociedades.



Apéndice 1

CORRESPONDENCIA MANTENIDA



APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

A lo largo de los meses que ha durado esta investigación, han sido muchas las personas y asociaciones relacionadas con la construcción con balas de paja con las que me he puesto en contacto. Con muchas de ellas el contacto ha sido esporádico, simplemente para consultas puntuales, mientras que con otras este contacto se ha prolongado en el tiempo. Su ayuda ha estado centrada en facilitarme bibliografía especializada, páginas web con contenidos interesantes o a resolverme dudas acerca del comportamiento de las paredes de balas de paja.

A continuación se presenta una relación de algunas muestras de la correspondencia mantenida con algunas de estas personas y asociaciones.

7/5/06 – Texto enviado a: Cesar Lema

Estimado/a señor/a:

Me llamo Javier Carro y soy estudiante de último curso de Arquitectura Técnica en la universidad de A Coruña. Recientemente he leído en el periódico que este mes se van a celebrar en la Provincia de Pontevedra (no me acuerdo del lugar), unas jornadas sobre la autoconstrucción, los muros de paja y demás. Me parece un tema muy interesante pero lamentablemente me es imposible acudir.

Me pongo en contacto con ustedes para que, si es posible, me envíen información sobre los temas que se van a tratar en las jornadas, las actividades realizadas o quienes serán los ponentes. Además les estaría muy agradecido si me pudiesen facilitar información del tipo de bibliografía a consultar o asociaciones, empresas, etc. que tengan experiencia en este tipo de construcción.

Les doy las gracias por anticipado y espero que me contesten lo antes posible.

Un saludo.

Hola Javier

Para la información que nos pides consulta www.casasdepaja.com. Nos alegramos que estudiantes de Arquitectura muestren interés por este tipo de técnicas constructivas. Ahora, quería pedirte un pequeño favor (si es posible). Este verano vamos a hacer una pequeña casita (44m2) con balas de helechos y queríamos hacerle una serie de pruebas a las balas como resistencia a la compresión y torsión y resistencia al fuego. Tanto de balas sin revoco como con revoco de arcilla y revoco de cal. ¿Sabes si algún departamento estaría dispuesto a hacernos este tipo de pruebas? La contrapartida podría ser pedir un pequeño proyecto. Si hubiera algún profesor interesado le puedes dar este correo o me facilitas el de él y me pongo yo en contacto.

Un abrazo

César Lema (Doctor en Biología)

9/5/06 – Texto enviado a: Cesar Lema

Estimado Lema Costas:

Soy Javier Carro y he recibido su correo y en la página web que me indica sólo encuentro una lista enorme de nombres que no sé para qué sirven. Me gustaría que me indicara mejor cómo encontrar esta información. Por otro lado, en cuanto a lo de los ensayos, no tengo inconveniente en decírselo a algún profesor y luego él sabría mejor a quien comentárselo pero por razones personales prefiero no hacerlo hasta dentro de 3 semanas. No sé si esto les es tiempo suficiente.

También estaba interesado en saber en qué van a consistir las jornadas que van a organizar ustedes.

Un saludo.

Hola Javier, alagado por el trato recibido, pero puedes tutearme.

La página que te dí es exacta, pero parece ser que tiene problemillas (me lo han comentado ya varias personas, yo hace tiempo que no la consulta). Supongo que la chica que la lleva, que estos días ha estado en la feria de Biocultura en Barcelona, en poco tiempo lo solucionará.





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

No nos importa esperar 3 semanas o más, te lo agradecemos.

El encuentro está enfocado como eso: un encuentro de Autoconstructores para conocernos y comentar aciertos, errores, nuevas técnicas, etc.. Como sabemos que el interés es grande hemos previsto una serie de talleres (pequeña construcción con balas de paja, revocos, fabricación de muebles) para gente que no tiene experiencia con paja, así como una serie de charlas. Lo que queremos dejar claro es que no se trata de un curso, con apuntes para aprender a hacer casas sino un encuentro entre gente con experiencia y sin ella para compartir conocimientos, inquietudes, intereses, etc.

Un abrazo

César

1/7/06 – Texto enviado a: Cesar Lema

Estimado César Lema:

Recientemente he hablado con el que va a ser mi tutor del proyecto fin de carrera sobre las construcciones con muros de paja y le he comentado que si yo podría utilizar el laboratorio para hacerle unas pruebas de carga a un fardo de paja y me dijo que lo tenía que consultar pero que creía que no habría ningún problema. También le digo que creo que esa sería la única prueba que yo podría hacer en la escuela porque tampoco tienen muchos aparatos.

Simplemente le quería comentar eso para que no piense que la Universidad no apoya la investigación. Les estaría agradecido si supiesen algún tipo de información que yo debiera saber para mi proyecto, aunque aún no tengo pensado empezarlo ahora.

Un saludo

Hola Javier, que tal!

gracias por insistir.

Referente a otra información, como ya te dije en la página web de la red hay mucha. Ahí también encontraras la dirección de Maren (es una arquitecta técnica que ha preparado casi toda la información técnica de la web). Maren está ahora mismo traduciendo del alemán los resultados de una investigación hecha en un laboratorio alemán homologado sobre diferentes pruebas realizadas a balas de paja. Así que si te pones en contacto con ella seguramente te podrá informar más técnicamente.

Un abrazo

César

28/7/06 – Texto enviado a: Amazon Nails Strawbale Building, Training and Consultancy

Hello Barbara Jones. Sorry for my English because it isn't very good. My name is Javier Carro and I am from Galicia (Spain). I'm a spanish student of Technical Architecture. It's similar to the degree on Architecture but it takes three years instead of five.

If I'm not wrong, you are a specialized Architect and with a lot of experience in construction with straw bales. I send this e-mail to you because I have to develop a project to finish my degree and I've chosen this kind of construction to work about it. I wonder if you could tell me some information about the results of some test, like a compressive test or others like that.

Besides, I want to ask you how can I get the book "THE BUILDING OFFICIAL'S GUIDE TO STRAW BALE CONSTRUCTION" by Kelly Lerner and Pamela Wadsworth Goode. It is an English book, like others that I have seen on internet. I will be very grateful if you give me any information about it.

I would like you to answer me as soon as possible. Thank you very much.

Yours sincerely,

Hi Javier,

Thanks for your enquiry - sounds like an exciting project! Unfortunately we're just too busy to write long emails about strawbale building, but I've attached some information that you might find useful. We don't stock the book 'THE BUILDING OFFICIAL'S GUIDE TO STRAW BALE CONSTRUCTION' by Kelly





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

Lerner and Pamela Wadsworth Goode, but we do sell a range of books, which you'll see in the Publications List (attached). I strongly recommend Barbara's book 'BUILDING WITH STRAW BALES', which is easy to understand and explains everything very well. Maybe you'd even like to come over to the UK and do one of our courses!

Good luck with everything.

*Best wishes,
Beth
Admin worker*

1/5/06 – Texto enviado a: Karuna, taller de bienestar

Hola. Me llamo Javier Carro y soy de Vedra (cerca de Santiago de Compostela), Provincia de A Coruña. Soy alumno de Arquitectura Técnica y estoy realizando my proyecto fin de carrera que consiste en analizar cómo construir con balas de paja. Buscando información en internet he descubierto que ustedes tienen una publicación y que la venden. A mi me interesaría el soporte digital en PDF pero no me gustaría comprar a través de internet porque me parece poco seguro. Quizás me interesase más el envío postal contra reembolso pero no sé desde dónde me lo enviarían y no sé cuanto serían los gastos de envío.

Me gustaría que me contestasen aclarándome estas dudas.

Un saludo

Hola Javier:

Me alegro de que se vaya difundiendo la construcción con balas. Espero que nuestro libro te sirva de ayuda, aunque no está enfocado a técnicos, sino al público en general, por lo que aunque parte de la información es técnica, el enfoque del libro es más abierto.

Te podemos enviar el libro desde Madrid o ávila que es por donde estamos. No se puede comprar por internet sino haciendo el ingreso en la cuenta que figura en nuestra web. Si lo prefieres puedes pagarlo contrareembolso, la tarifa de correos en este caso es de 5€. En el otro caso los gastos de envío serían 2€. Es decir:

**ingreso en cuenta, Total: 10€*

**contrareembolso. Total: 13€*

Envíanos el pedido si te interesa.

Mucho ánimo con tu Fin de carrera.

Patricia Cebada

1/8/06 – Texto enviado a: Catherine Wanek

Hello Catherine Wanek. My name is Javier Carro and I'm from Spain. Please, excuse me for my english, it is not very good.

I saw your e-mail adress on the website www.epsea.org. I know that you have written the book "The New Strawbale Home". Besides, I know that you contributed in the publication of "The Last Straw Journal". For all this reasons, I think that you are someone who knows a lot about this type of construction.

I'm a student of Technical Architecture. It's similar to the degree in Architecture. To finish my university studies I have to develop a project. I've decided to make it about the construction with straw bales. By the way, where are you from? United States or Unided Kingdom?

I'm very interested in the results of the test which has been developed in Nuevo Mexico with this material in order to measure the fire resistance. Besides, I would like to get some book or manual about it. Getting this kind of books here in Spain is almost impossible.

I hope you reply me as soon as possible to be in contact.

Thank you very much.





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

Hello Javier --

Let me suggest that you visit the website www.grisb.org -- which will give you information about strawbale code testing as well as codes in various US regions.

Also, there are people in Spain who have a strawbale organization, and who are working on a book in Spanish -- it may be done already. For this information, contact

Rikki Nitzkin Aulás, Lleida (Spain)

Spanish Strawbale Network

casasdepaja@yahoo.es (Network business)

(0034) 657 33 51 62

www.casasdepaja.com

"We Have the Right and Responsibility to Create the World we Want to Live in"

Good luck with your work.

Best regards,

Catherine Wanek

1/8/06 – Texto enviado a: Amazon Nails Strawbale Building, Training and Consultancy

Hello Beth. I want to thank you for your answer. Besides, I'm happy because yesterday it was the first time I wrote an e-mail in English, and you have understood me in spite of I'm sure I have had a lot of mistakes.

I will try to find the book of Barbara Jones but I think it will be quite difficult. Maybe in England it is not difficult but I think it will be here in Spain. For this reason, when you have more free time, I would like you to send me some electronic book or manual or something like that, because there is some information I can get here on internet but other information like that, I can't find it here.

I would like we keep in touch.

Thank you very much

Hi Javier,

Don't worry, your English is great!

You can download the book from our website: www.strawbalefutures.org.uk.

Best wishes,

Beth

Admin worker

2/8/06 – Texto enviado a: Catherine Wanek

Hello Catherine.

Thanks for your answer. I had a look at the website www.grisb.org and it is very interesting for me because it has a lot of information about this kind of construction in the United States. I have gotten the code of California, Nevada, Nuevo Mexico and is very interesting for me to know how you work with it and how your laws are. There is something very important to me but I can't find it. It is the result of some test. I suppose that if in United States this kind of construction is so common, somebody has made some kind of test. I would like to get it because I am going to carry on a compressive test to a bale and I want to know how you test it.

I know that in Spain there are organizations and I am in contact with them but I know that in the United States or In the United Kingdom I can get more information.

Thank you very much.





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

Hello Javier -- Let me suggest two other websites for strawbale testing information:

www.dcat.net and www.ecobuildnetwork.org

Also, there is a new book coming out in about two months that will be useful to you, that will include all the testing data, and other design criteria. I believe it will be called "Design of Plastered Straw Bale Buildings" or something similar. It will be available from us, as well as www.ecobuildnetwork.org

Best Regards,

Catherine Wanek

Natural Building Resources

www.StrawbaleCentral.com

3/8/06 – Texto enviado a: John Glassford

Hello Mr. Glassford:

My name is Javier Carro and I'm a student of technical architecture from Galicia (Spain). I'm developing the project to finish my degree about the construction with straw bales. I know that you have made some studies about this kind of construction and I would be very grateful if you could send me some report about the compressive strength of straw bales.

Thank you very much.

Javier Carro

G ' day Javier

Here are two papers written by Dr John Zhang and Mike Faine who tested straw bale walls for the Australian building codes. I have other tests but these two are comprehensive.

Good luck with your studies and let me know how you go and please visit us down under one day you will be very welcome.

Kind regards

John Glassford

Huff 'n' Puff Constructions

8/8/06 – Texto enviado a: John Zhang

Hello professor John Q. Zhang. I'm writing this e-mail to you again because I have already found information made for you about one test of "LOAD CARRYING CHARACTERISTICS OF A SINGLE STRAW BALE UNDER COMPRESSION". I have been watching the pictures and I saw that the bale was tested in a right angle of the direction of the fibres. I don't know why it is so because I think that the bales in a wall must be in the other position. I would like you to reply me to clear this doubt. For this reason I want to know if you have tested the bales in the other position. If it is so, I can't find it.

I would like to know if somebody in your university has made other tests to the bales.

I would like you to answer me because it is very important to my investigation.

Thank you very much.

Hi, Javier,

The bales in a strawbale house can be laid either flat or on edge. Normally it is laid on flat but there are projects where the bales are laid on edge as it occupies less space, i.e., the wall is thinner.

We have conducted tests for both. What we found was quite interesting. The strength of bales on edge is higher than on flat when you look at the load per unit area (stress/strength). This is understandable as when laid on edge, all the individual straw behave like little columns restrained and supported by the string and each other, therefore a higher buckling/failure load. On flat it is easy to compress as there are more voids in the bale which can be crushed easily.

Hopefully this will help you.

Where are you from??

Dr John Zhang

Senior Lecturer in Construction





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

9/8/06 – Texto enviado a: John Glassford

Hello Mr. Glassford.

I'm very grateful for the information you have sent to me. I would like that you tell me if you have more information about tests in straw bales.

Thank you very much

' day Javier

You should find more tests here:

<http://www.ecobuildnetwork.org/index.htm?http&&www.ecobuildnetwork.org/strawbale.htm>

<http://www.ecobuildnetwork.org/>

If you join SB-r-us discussion list you will find a lot of help there especially in the files section join up here:

<http://groups.yahoo.com/group/SB-r-us/>

You wil find all that you need here on this list just join up and go to the files section.

Kind regards

John Glassford

Huff 'n' Puff Constructions

18/8/06 – Texto enviado a: One-world-design

Hello. I'm a student of Technical Architecture. I'm from Galicia (Spain) and I'm developing a project to finish my university studies. This project consists of the construction with straw bales. I want to ask you for the e-mail of Kelly Lerner if you know it because I know that she is a very good Architect in this area. I know that she is a very busy woman.

I would like to write to Kelly about this kind of construction.

Thank you very much

Hello Javier,

It's great that you're interested in strawbale/sustainable construction. We're incredibly busy these days, so unfortunately we aren't available to answer strawbale or construction questions at the moment.

I'm attaching a resource list for you - The Last Straw Newsletter (www.thelaststraw.org) is likely to be the most helpful resource for you. It's very exciting to hear about new people getting involved in strawbale, it's good for everyone. We wish you the very best of luck.

Sincerely,

Deborah McCandless

Business Manager, One World Design

24/8/06 – Texto enviado a: The Last Straw journal

Hello. My name is Javier Carro and I'm from Galicia (Spain). I'm a student of Technical Architecture and I'm developing the project to finish my degree, about the construction with straw bales. I want to ask you what I have to do to get the publishing N°17 of winter of 1997. I'm interested on it to know about "spar and embrane structive" by Black, Mannik. I think that your publication is very very good.

I hope you to answer me as soon as possible.

Thank you very much.

Javier,





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

Thank you for your kind words about The Last Straw journal.

We have TLS#17/Winter 1997 available for \$8.00. Postage can be any of the rates below: Global Priority Mail - Flat-rate Envelope (Small) 4 - 6 Days \$5.25

Economy (Surface) Letter Post (Rate for pieces 16 ounces or less) 4 - 6 Weeks \$4.10

You can print out the subscription/back issue order from our web site www.thelaststraw.org and fax it to indicate credit card and expiry date information and your order.

Let me know if you need additional information.

Joyce Coppinger

24/8/06 – Texto enviado a: Rudolf Bintingier

Hello.(Sorry for my English). My name is Javier Carro and I'm a student of Technical Architecture in Galicia (Spain). I'm developing the project to finish my degree and it is about the construction with straw bales. I don't know what kind of relationship you have with the S-House but I would like to know if this building has the licenses like any other building made of any other material. I would like to know what is necessary to do in Austria in order to get the licenses to build.

I hope you to answer me as soon as possible.

Thank you very much.

Dear Sr. Castro,

there was nearly no difference to other buildings. What we did was to show that our construction is fire resistant. you can find more information on our homepage www.s-house.at or [Http://www.nawaro.com/cgi-bin/forum.pl?action=show&groupid=4](http://www.nawaro.com/cgi-bin/forum.pl?action=show&groupid=4).

Best regards,

25/8/06 – Texto enviado a: Rudolf Bintingier

Hello. I'm Javier Carro again. I am surprised that it is so easy in Austria to build with straw because I think that in Spain it isn't possible. I am happy because this means that some day we could build it legally here in Spain and it is an incentive more for carry on with my project

I think that the E-house is monitorized and I want to ask you if you have knowledge about some information analyzing the data of humidity, temperature, etc.

Thank you very much.

Hello,

we have some information and it will be published in near future. I also found some adresses of strawbale builders in Spain. Maybe they can tell more about licenses.

Spanien: Rikki Nitzkin, SP, Aulas, Ares, Huesca, Strohhallenbau

<http://www.casasdepaja.com>, email: rmitzkin@hotmail.com

Maren Termens-Steiner, SP, 17255 Begur, Girona, c/Vera 8,

email: marenbegur@hotmail.com

Best Regards,

Rudolf Bintingier





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

25/8/06 – Texto enviado a: Cesar Lema

Hola. Mi nombre es Javier Carro y soy el estudiante de Arquitectura Técnica que está haciendo el proyecto fin de carrera sobre la construcción con balas de paja. Me preguntaba que tal les ha ido en la construcción de esa casa que iban a hacer en Pontevedra. Si pudiera ser me gustaría tener información de esa construcción.

En un principio yo tenía pensado realizar una prueba de carga en la Escuela de Arquitectura Técnica pero debido a la cantidad de información técnica que he encontrado en internet (sobre todo ensayos de carga), he decidido no hacerla.

Si no recuerdo mal, usted es doctor en biología y me gustaría comentar con usted los resultados de un ensayo que le adjunto sobre la descomposición de los fardos de paja. En caso de que no lo entendiera por estar en inglés le ruego que me lo comunique y le explicaré con detalle, a raíz de lo que he extraído con una lectura rápida, en qué consisten mis dudas.

El estudio tiene como resultado, si no recuerdo mal, una descomposición de materia orgánica de un 3% a lo largo de un año y suponen, por un razonamiento que ellos hacen, que esta cifra tiende a cero. Me gustaría saber si usted está de acuerdo con ese razonamiento porque yo entiendo que mientras en el muro estén la materia orgánica (paja), las bacterias, la humedad adecuada y el oxígeno, puede seguir teniendo lugar la descomposición.

Además, ¿qué sucede con ese 3% de materia que se descompone?. ¿Se supone que el muro pasa a tener un 3% menos de material efectivo para soportar la carga? Si es así, con el tiempo irá perdiendo altitud. También tengo la duda de qué pasa con ese 3%. ¿Se queda ahí, se pasa a estado gaseoso y se marcha al exterior,...?

Espero que me pueda responder.

Quizás sean demasiadas preguntas pero me gustaría que me dijese, si lo sabe, de algún libro interesante sobre la construcción con paja traducido al español. Tengo varios en inglés y creo que en el extranjero tienen muy buenos libros.

Un saludo

Hola Javier, que tal

<Me preguntaba que tal les ha ido en la construcción de esa casa que iban a hacer en Pontevedra. Si pudiera ser me gustaría tener información de esa construcción>

Sí, al final se pudo acabar, y precisamente este fin de semana nos reunimos algunos voluntarios para terminar de revocarla por dentro y por fuera de una mezcla de arcilla, paja y excrementos de burro en una proporción 1:1:1

<El estudio tiene como resultado, si no recuerdo mal, una descomposición de materia orgánica de un 3% a lo largo de un año y suponen, por un razonamiento que ellos hacen, que esta cifra tiende a cero. Me gustaría saber si usted está de acuerdo con ese razonamiento porque yo entiendo que mientras en el muro estén la materia orgánica (paja), las bacterias, la humedad adecuada y el oxígeno, puede seguir teniendo lugar la descomposición.>

Le eché un vistazo al trabajo, aunque no leo ni escribo inglés, pude comprender la mayor parte del mismo.

Un factor limitante para el desarrollo de hongos (principales descomponedores de la paja) y bacterias es la presencia de oxígeno y de agua. De ahí el hincapié en que las balas de paja estén secas (creo recordar que por debajo del 15% de humedad) y protegerlas de la humedad sobretudo con buenos aleros en las caras expuestas a vientos húmedos y con unas buenas cimentaciones que impidan la subida de agua por capilaridad. Por otra parte hay que tener en cuenta que las casas de balas de paja se recomienda siempre revocarlas: puede ser de arcilla, cal e incluso en USA con cemento para cumplir la reglamentación. Dentro del revoco seco (sea cual sea) hay muy poco oxígeno, haciendo un hábitat desfavorable para los microorganismos que producen la putrefacción. La paja se "momifica" dentro de la arcilla en el caso de la cal la paja se "mineraliza".

Recuerda que existen casas con más de 100 años (una docena en USA) que siguen en pie y siendo habitadas.





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

<Además, ¿qué sucede con ese 3% de materia que se descompone?. ¿Se supone que el muro pasa a tener un 3% menos de material efectivo para soportar la carga? Si es así, con el tiempo irá perdiendo altitud. También tengo la duda de qué pasa con ese 3%. ¿Se queda ahí, se pasa a estado gaseoso y se marcha al exterior,...?>

No sé si ese 3% de material que en teoría se descompone es suficientemente significativo para modificar las propiedades estructurales y de aislamiento de las balas de paja, más aún sabiendo, como dice el estudio, que tiende a cero (supongo que debido a la acción del revoco dificultando las condiciones de crecimiento de los microorganismos descomponedores).

Ese 3% se convierte en CO₂ cerrando el ciclo del carbono. Si dejáramos la paja de un campo de cereal descomponerse en superficie el desprendimiento de CO₂ debido a la acción de microorganismos descomponedores y posteriormente microorganismos mineralizantes sería igual al CO₂ absorbido por el campo de cereal para crecer y crear la planta de cereal. De ahí que el empleo de balas de paja para hacer casas sí que reduce el desprendimiento de CO₂ a la atmósfera ya que en este caso el CO₂ estará inmovilizado en forma de la lignina, celulosa, hemicelulosa, etc que constituyen la paja del cereal

<Quizás sean demasiadas preguntas pero me gustaría que me dijese, si lo sabe, de algún libro interesante sobre la construcción con paja traducido al español. Tengo varios en inglés y creo que en el extranjero tienen muy buenos libros.>

Sé que Rikki y Maren ya han acabado el que estaban haciendo en español y parece ser que está muy bien, al menos para aquellos que queremos autoconstruirnos nuestros hogares.

Te envío enlace de la Conferencia Internacional de Construcción Fardos de Paja que se celebrará del 24 de septiembre al 1 de octubre del 2006 en Camp Kawartha, Ontario Canada. www.strawbalebuilding.ca

Un abrazo

César

31/8/06 – Texto enviado a: Karuna, taller de bienestar

Hola Patricia. Gracias por tu contestación.

En tu correo dices que hay tres proyectos que han sido visados en el Colegio de Arquitectos y quería preguntarte si sabes de qué ciudad eran esos colegios porque me gustaría ponerme en contacto con ellos para tener información de primera mano.

Dices que para tu casa solicitaste licencia de obra menor. No tengo muy claro esto porque creo que cada ayuntamiento lo interpreta de una manera pero entiendo que no tuviste que presentar en el ayuntamiento ningún proyecto visado por ningún colegio profesional y que en el ayuntamiento te concedieron una licencia de obras. Corrígeme si me equivoco.

Un saludo y gracias otra vez.

Los proyectos son en Alicante, Navarra y Barcelona (provincias, no sé exactamente la ciudad). Como dices para la casa nuestra lo hicimos así. Para el Centro de actividades que queremos hacer tendremos que presentar el proyecto que estamos haciendo y sobre el que tengo también varias dudas. De todas formas en cada ciudad lo plantearán de una forma por no haber aún en España normativa sobre estas construcciones

Patricia Cebada

Rubén Solsona

Karuna, taller de bienestar





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

6/9/06 – Texto enviado a: Cesar Lema

Hola señor Lema. Tengo una duda técnica y no sé a quien preguntarle porque no sé quien tiene la respuesta pero se la formulo por si usted tiene idea de esto.

Creo que en el archivo que le envié la última vez hablaba del contenido máximo de humedad que debían tener las balas de paja para ser durables. Creo recordar que no debían exceder del 30%. Por otro lado tengo estudios reales de datos obtenidos in situ a través de la monitorización de una bodega en Canadá y uno de los datos obtenidos era la humedad relativa. Creo recordar que la humedad relativa de los sensores en el muro rondaba el 70%. Por otra parte un artículo que leí rápidamente en inglés asociaba una humedad relativa de un 70% en el ambiente a un contenido de humedad en la bala de un 30%. En todo este asunto aparecen tres valores, la humedad relativa, la temperatura (que influye en la humedad relativa) y el contenido de humedad de la bala.

Mi duda es si existe alguna relación entre estos tres datos o si sería necesario hacer ensayos para poder establecer una relación entre ellos. Lo que yo necesito es a partir del valor de la humedad relativa determinar el contenido de humedad de la bala.

Además le quería hablar de la casa que ustedes han construido en Pontevedra. Cerca de donde vivo yo teníamos pensado construir un cobertizo para coches. Tenía pensado utilizar el seguimiento de éste para meterlo como información en el proyecto. Finalmente no ha podido ser pero me gustaría vivir la experiencia de poder visitar una construcción de este tipo. Me gustaría saber si me podría enviar la dirección de esta vivienda por si, algún día que ande por cerca de Pontevedra, me puedo acercar a visitarla si es que puede ser.

Un saludo

Hola Javier, que tal!

<Creo que en el archivo que le envié la última vez hablaba del contenido máximo de humedad que debían tener las balas de paja para ser durables. Creo recordar que no debían exceder del 30%.>

Este porcentaje es muy elevado (révisalo) ya que los procesos de putrefacción por parte de microorganismos puede ocurrir cuando la paja alcanza una humedad de entre el 15 al 20 %, dependiendo de la temperatura. De hecho una norma es que la humedad de la bala de paja no supere el 15%.

<Mi duda es si existe alguna relación entre estos tres datos o si sería necesario hacer ensayos para poder establecer una relación entre ellos. Lo que yo necesito es a partir del valor de la humedad relativa determinar el contenido de humedad de la bala.>

Sí, supongo que sí, lo importante es saber que las balas de paja se revocan sea de arcilla sea de cal y son estas, las que juegan un papel de intercambiador de la humedad entre la bala de paja y el ambiente exterior, un poco como pasa con la madera. Cuando la bala está húmeda el revoco (cal o arcilla) "extrae" esa humedad y la manda hacia el exterior. Cuando la bala está muy seca el revoco "chupa" la humedad del exterior. Esto se ha constatado de forma empírica.

Como soy neófito en esta materia lo que he hecho es plantear tú duda en la lista de la Red de paja para ver si algún/a arquitecto/a te contesta.

<Me gustaría saber si me podría enviar la dirección de esta vivienda por si, algún día que ande por cerca de Pontevedra, me puedo acercar a visitarla si es que puede ser>

Sí, cuando quieras puedes visitar el pequeño almacén de balas de paja. Antes llama al móvil: 669 050 970, le dices que vas de mi parte (César)





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

12/9/06 – Texto enviado a: Rafael Serra

Hola. Me llamo Javier Carro Castro y soy estudiante de Arquitectura Técnica en la Universidad de A Coruña. En la actualidad me encuentro realizando mi trabajo fin de carrera que consiste en el estudio de las posibilidades de la paja embalada como material de construcción. Sé que en España está muy poco extendido este tipo de construcción pero que aún así, Cataluña es una de las comunidades en las que más se construye con este material.

Me pongo en contacto con ustedes porque una persona me habló de que ustedes habían desarrollado una serie de programas informáticos que creo que me podrían ser útiles para una parte de la investigación que estoy realizando. Estos programas creo que se llaman Claca, Rafis y no sé si alguno más. Mi intención, y según tengo entendido es para lo que sirven, era hacer un estudio comparativo del gasto energético de una vivienda normal de la que consiga un proyecto con materiales tradicionales y de la misma vivienda pero construida con balas de paja. Uno de los objetivos sería determinar hasta que punto es más eficiente energéticamente la casa de paja que la normal.

Creo que también tienen algún programa que hace lo mismo pero con la iluminación y con la acústica. Tengo entendido que se pueden descargar gratuitamente y me gustaría que me lo confirmaran y me dijeran cómo los puedo conseguir. No sé si los tienen en Castellano pero me sería mucho más fácil su manejo.

También me gustaría que me dieran su opinión acerca de esta parte de la investigación y por supuesto estoy abierto a sugerencias que me puedan hacer para este estudio comparativo.

Les doy las gracias por anticipado y espero recibir noticias tuyas lo antes posible.

Un saludo

Hola

Creo que podrías utilizar el programa Archisun (encontrarlo en : www.upc.edu/aie), introduciendo las características de los cerramientos en la pantalla de "detalle de superficies de piel"

Suerte con tu trabajo

Saludos

Rafael Serra

24/9/06 – Texto enviado a: John Straube

Hello Sr. Straube. My name is Javier Carro and I'm a student of Technical Architecture in the University of A Coruña (Galicia – Spain). I'm developind the project to finish my degree, about the construction with straw bales. I have read the report that you have written with Chris Schumacher about the winery monitoring. I send this e-mail to you because I would like to ask you for some data. Is very important to me to have the data of the relative humidity in outside in this case because I want to compare it with the climate we have here in Galicia. We have here an average of the 75% RH almost all the year. I saw the graph that includes this data but I don't understand it very well. I would be very grateful if you send me some data from this report that I can understand.

I hope you to answer me as soon as possible. Thank you very much.

Javier Carro

Hi there Sr Carro

The average RH is somewhat useful, but you have to know more about what it does over the year. Ridge Winery is located in a dry area that has large temperature swings. So, the RH rises to almost 100% most nights (hence, dew forms on surfaces) but when the sun comes out and the temperature rise 15 C the RH drops dramatically. The charts presented were all hourly data, so they bounce around a lot.

I have attached the spreadsheet with the data for weather for your interest.

Remember, the Ridge Winery was a challenge because the interior RH was so high and steady. The exterior RH is quite low and very safe for strawbale buildings. In general, the RH of the exterior is not the big concern, but the RAIN is.

You should also purchase the new design book from the Green Building Press, at <http://www.greenbuildingpress.com>





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

*Dr John Straube
Associate Professor
Dept of Civil Engineering & School of Architecture
University of Waterloo
Waterloo, Ont., Canada*

27/9/06 – Texto enviado a: John Glassford

Hello Mr. Glassford.
I'm writing to you because I know that you have made some acoustical test in a straw bale studio of Australia. I have some data I have found on internet but I would like to get the complete report. I don't know if you can send it to me.
Thank you very much

*G ' day Javier
No worries mate.
I attach the rudimentary sound tests that we conducted at the sound studio that we built from straw bales in the middle of Sydney some years ago now.
You will be very welcome to use them any way you want to. The tests were not very scientific but they did prove what we already knew about the sound qualities of straw bale walls. There have been several lother sound tests carried out and if you want I will write to the European straw bale discussion list on your behalf and see if anyone has them.*

*Kind regards
John Glassford
Huff 'n' Puff Constructions*

29/9/06 – Texto enviado a: Rudolf Bintinger

Hello Sr. Bintinger. My name is Javier Carro and I wrote an e-mail to you some weeks ago. I thik that before the construction of the S-HOUSE, you have carried out some test like fire resistance or acoustical. I have some reports about several tests in labs of United States but no one in Europe. I would like to get that reports in order to use them in my project data from some lab in Europe with European codes. It is very important to me.
Thank you very much.
Javier Carro

*Dear Mr. Castro,
we have made fire resistance and acoustical tests. Unfortunately the documents are in german. We can give you the information if you can offer us something in return so everybody could benefit. Maybe you can send us the tests of the US labs.
Best regards,
Rudolf Bintinger*

*Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Gruppe angepasste Technologie
Technische Universität Wien
Wiedner Hauptstrasse Nr. 8-10
A-1040 Wien*





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

3/10/06 – Texto enviado a: Rudolf Bintinger

Hello Mr Bintinger.

I know that the S-House is monitored and I would like to know if you could send me some of the data from the building.

Thank you very much.

Dear Mr. Castro,

please find attached data of fire and acoustic tests. They are all in German. We can order them in English but we would have to pay. I tried to give you the most important information in English. find the original certificates attached. The measuring data of the s-house is not for public yet. I can only send you some information about fungal growth in the straw. I did not have time to check the data you send me in detail but they seem interesting, thank you.

best regards, RB

Fire test, wall construction:

wall passed F90 (Önorm B 3800-2 Edition 1997), wood construction with straw and plastered (2cm clay on the inside, 2 cm lime on the outside) , total thickness 43 cm

Fire test bale:

Straw - apparent density 90 and 120 kg/m³ are normal flammable which is B2 referring to Önorm B 3800, Part one, Edition 1998

Acoustic test:

Rw (C,Ctr) 55 (-3,-10) dB; Construction: 9 cm solid cross-laminated timber boards, 50 cm straw bales (110-115 kg/m³), 3-4 cm clay plaster - there were several variations tested

3/10/06 – Texto enviado a: Cesar Lema

Gracias por la información. La miraré en cuanto pueda.

Tengo una duda acerca de la construcción que hicieron ustedes. Si no recuerdo mal, me dijo que para el recubrimiento utilizaron una mezcla que utilizaba excrementos de burro. Por información que he leído, los excrementos creo que pueden acelerar el proceso de descomposición de la paja. La paja en sí no se descompone fácilmente pero al mezclarla con los excrementos creo que se aceleraría el proceso. Supongo que si lo han hecho es porque están seguros de no tiene problema pero me gustaría que me explicara el porqué.

Me gustaría mucho ver alguna foto general de la construcción que es.

Un saludo.

Javier Carro

Hola Javier

Existen muchos pueblos que emplean excrementos de animales para construir sus hogares, por ejemplo en Africa los Masai recubren sus chozas de ramas con bosta de vaca. Lo importante en el caso de los revocos es que no estén continuamente húmedos, para ello se aíslan los muros de balas de paja del suelo con una buena cimentación que evite subidas de agua por capilaridad y unos buenos aleros que impidan que el agua de lluvia moje continuamente los muros. Uno de los factores más limitantes para los microorganismos es el agua, en ausencia de agua los microorganismos mueren o se aletargan (esporas de hongos). Así que si el revoco permanece seco no pasa nada.

Un abrazo. César





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

10/10/06 – Texto enviado a: John Zhang

Hello Mr. Zhang. I want to ask you for something about the report you have written about the test of the straw bale walls in 2000 and 2002. You use the word "chaff" as a component of the render in the wall with earth render. I tried to translate it to Spanish but I can't do it. I suppose that it is straw in small pieces but I'm not sure. Could you tell me something about this?

Thank you very much.

Javier Carro

Chaff is short chopped straw.

20/10/06 – Texto enviado a: John Zhang

Hello. I'm developing my project about the construction with straw bales and I have a doubt. I don't know if there is any report about some test of wind resistance. I think that it is an important aspect to the buildings' walls. I have a lot of reports from a lot of tests but no one about the wind resistance. I would like that you tell me something about this.

Thank you very much.

Javier Carro.

We have not done any test on wind pressure yet

23/10/06 – Texto enviado a: Cesar Lema

Hola César. Hace tiempo que no hablamos. La verdad es que estoy muy ocupado y casi no tengo tiempo. No sé si te acuerdas pero hace tiempo te dije que si me podías enviar unas fotografías de esa construcción que hicisteis vosotros en Pontevedra. Además te dije que si me podías dar la dirección para pasarme por allí un día que me coincidiera y saber de antemano por dónde debería ir porque la verdad es que no conozco Pontevedra. Si llegase a ir, incluso prefería ponerme de acuerdo contigo para eso y así poder vernos. Me imagino que es la construcción con balas de paja que tengo más cerca en este momento. No sé si hay muchas en Galicia y creo que antes de terminar mi proyecto debería ver alguna.

De entrada, si me puedes enviar alguna fotografía te lo agradecería, más que nada por curiosidad.

Un saludo

Hola Javier, que tal!

<Me imagino que es la construcción con balas de paja que tengo más cerca en este momento. No sé si hay muchas en Galicia y creo que antes de terminar mi proyecto debería ver alguna.>

Está un adosado a la casa de piedra que ha hecho Aitor cerca de Ourense y también hay un chico extranjero de nombre Boyer que creo que tiene una construcción de paja en Amil (donde se celebra la romería de los Milagros de Amil) pero es lo único que sé, no tengo más datos.

<De entrada, si me puedes enviar alguna fotografía te lo agradecería, más que nada por curiosidad.>

Por ahora aún no dispongo de fotografías y aún tardaré un tiempo. En la web de A.N.D.R.E.A: www.andreaasociacion.com, puedes ver alguna (tienes que buscar)





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

<Además te dije que si me podías dar la dirección para pasarme por allí un día que me coincidiera y saber de antemano por dónde debería ir porque la verdad es que no conozco Pontevedra>

La dirección es: A.N.D.R.E.A, lugar de Couso 6B Curro-Barro (Pontevedra).

Te adjunto un mapa de situación. El mejor día para venir es Sábados por la tarde (a partir de las 16:00). El móvil es: 669 050 970 (preguntar por David o Elsa)

Un abrazo

César

28/10/06 – Texto enviado a: Bruce King

Hello Mr. King. The next few days I hope to get the book that you have recently published. My university library has bought it and I will be able to read it soon.

I'm analyzing the capacity of the walls to resist earthquakes and when I was looking for information on internet about this, I found your book "Buildings of earth and straw". I would like to know if in the chapter of the earthquakes loads you mention some test. I have read one report about the test carried out for Cale Ash and Mark Ashheim in Illinois but it isn't very useful for me. I would like to know if you have information about any other test.

"Buildings of Earth and Straw" is now 10 years old, so I would use primarily information in "Design of Straw Bale Buildings" (the new book).

All of the seismic tests to date (including Ash/Aschheim) are summarized and discussed in "Design of Straw Bale Buildings". When you have that, you will have pretty much all that is available.

In case you are interested, I will be giving three talks in England soon:

Univ. of Nottingham 11/16/2006

Univ. of Bath 11/17

21/11/06 – Texto enviado a: John Glassford

Hello. I'm Javier Carro, the student that is developing the project to finish the degree, about the construction with straw bales.

In this time, I'm writing you because I would like to get some information. I would like to know if there is some normative/code/law about the construction with straw bales in Australia. I know that there is some codes about this in some states of the United States, but I don't know if there is some other country that has it. I would like to know all that you can tell me about this issue.

I hope you to answer me as soon as possible.

Thank you very much.

Javier Carro.

G ' day Javier

This is how we deal with the Building Code of Australia; <http://www.abcb.gov.au/>

• *An Expert Opinion:*





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

Huff 'n' Puff Constructions led by John Glassford and in conjunction with Morse McVey and Associates, structural Engineers, will certify the proposed straw bale building under the provisions of the Building Code of Australia as follows:

"(a) Subject to 1.2.3 and 1.2.4, evidence to support that the use of a material or form of construction has been submitted to the tests listed in the report, and setting out the results of those tests and any other relevant information that demonstrates its suitability for use in the building.

(i) A report issued by a 'Registered Testing Authority', showing that the material or form of construction has been submitted to the tests listed in the report, and setting out the results of those test and any other relevant information that demonstrates its suitability for use in the building.

(ii) A current 'Certificate of Conformity' issued by the ABCB or a current 'Certificate of Accreditation.'

(iii) A certificate from a 'professional engineer' or other appropriately qualified person which-

(A) Certifies that a material, design or form of construction complies with the requirements of the 'Housing Provisions'; and

(B) sets out the basis on which it is given and the extent to which relevant specifications, rules, codes of practice or other publications have been relied upon.

We do not have building code specifically for straw bales or alternative forms of materials and methods. However the BCA is performance based and as long as you can show the material or method to be able to perform to the requirements of the Building Code of Australia then there is no reason for an engineer not to certify the building.

I hope that helps you.

Kind regards

John Glassford

Huff 'n' Puff Constructions

15/12/06 – Texto enviado a: Seguros Bilbao

Estimados miembros de Seguros Bilbao:

Me llamo Javier Carro y me pongo en contacto con ustedes porque me encuentro realizando un trabajo de investigación para la Escuela de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña, trabajo que necesitaría completar con información referida a los seguros de viviendas.

El mencionado trabajo consiste en un estudio sobre un sistema de construcción ecológica que emplea balas de paja, tanto como cerramiento como con finalidad estructural. En España no está muy extendida esta práctica constructiva, pero en países como Estados Unidos, Francia o Australia es bastante común. Además, en Estados Unidos existen muchas compañías de seguros que aseguran dichas viviendas, lógico pensando que es un tipo de vivienda segura y con muchos usuarios.

Mi consulta está encaminada al tema de seguros de hogar y básicamente consiste en saber si, por parte de su empresa, sería posible asegurar este tipo de viviendas. Tengo noticias confusas de que en España existe alguna vivienda de estas características que ya ha sido asegurada pero desconozco con qué compañía, por lo que no se si ha sido la suya.

Si no conocen el sistema constructivo, que sería lo más normal, les digo que existen estudios que indican que el hecho de que se trate de paja embalada (con el correspondiente recubrimiento) no supone ningún riesgo especial frente al fuego o estructural. Además, las balas de paja se podrían utilizar en los cerramientos exteriores como simple cerramiento, es decir, simplemente para cerrar el espacio y como si se tratase de grandes ladrillos.

Espero que tengan en consideración la consulta que les hago y que me respondan con la mayor brevedad posible. Les animo a que me consulten cualquier duda que necesiten que les aclare de cara a poder ofrecerme una respuesta más precisa.

Les doy las gracias por anticipado y quedo a la espera de tener noticias tuyas.





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

Un saludo.
Javier Carro

Estimado Javier,

Ante todo deseo felicitarte por tu interesante proyecto y desearte que tus conclusiones puedan ser utilizadas en la práctica de la vida real.

En cuanto a lo que nos pides he de decirte que al ser una materia nueva, como muy bien dices sin demasiada implantación en España, no tenemos elaborado ningún seguro de hogar específico para viviendas de ese tipo, no quiere decir que no sean asegurables; lo que si significa eso es simplemente que ante la ausencia de demanda la garantía concreta todavía no existe. No obstante, hoy en día las grandes aseguradoras podemos dar cobertura a prácticamente cualquier riesgo, por lo que presupongo que esas viviendas de las que hablas ya existentes en España pueden estar aseguradas con un Seguro de Hogar “a la carta”, por llamarlo de alguna forma, creado específicamente para este riesgo concreto, para ese cliente concreto.

Si el material es asimilable en cuanto a riesgo a la madera y lo que necesitas es saber una orientación sobre los precios, te los puedo aproximar. Si el riesgo existiera de verdad, habría que remitir a un perito para que valorase la vivienda y un técnico para que elaborase la tarifa específica. Digamos que no sería tan sencillo.

Tu me dirás si necesitas alguna aclaración, espero haberte servido de ayuda,

Atentamente

21/12/06 – Texto enviado a: Seguros Santalucía

Estimados Señores:

Me llamo Javier Carro y me pongo en contacto con ustedes para hacerles una consulta acerca de los seguros de hogar. En la actualidad me encuentro realizando un estudio de investigación para la Universidad de A Coruña acerca de un tipo de construcción ecológica que utiliza paja embalada. Es un tipo de construcción que está bastante extendida en Estados Unidos pero que aquí, en España, no tiene demasiados usuarios. Tengo información de que las viviendas de Estados Unidos son aseguradas como cualquier otra, pero no se si las pocas que existen en España lo están. Supongo que ya se imaginan mi consulta.

Lo que yo les quiero preguntar es si podrían hacer un seguro de hogar a una vivienda de estructura típica de hormigón armado pero que las paredes exteriores fuesen de balas de baja apiladas y con un recubrimiento de mortero de cemento. Es muy posible que desconozcan las características de este sistema constructivo, pero existen muchos estudios realizados en muchas universidades de todo el mundo que aseguran sus buenas cualidades (acústica, resistencia al fuego, estructural,...). El resultado final de la vivienda puede ser aparentemente el mismo que cualquier otra, salvo por el grosor de las paredes.

En estas condiciones me gustaría saber si, sin entrar en muchos detalles, se podría asegurar una vivienda de estas características como ya las hay en España.

Les doy las gracias por anticipado y espero recibir noticias tuyas lo antes posible.

Buenos días:

Desconocemos el tipo de construcción al que hace referencia.

Con una descripción técnica de los materiales que se emplean, en el que se especifique los riesgos que pueden afectarle, podría fijarse una tasa de prima para su asesoramiento, como ya existe en viviendas construidas en madera u con módulos prefabricados.

Seguros Santalucía





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

22/12/06 – Texto enviado a: Seguros Santalucía

Estimados señores:

Muchas gracias por dedicarme su atención e intentaré informarlos con más detalle del tipo de construcción para que me puedan informar con mayor precisión. De todos modos, no necesito saber ni siquiera precios orientativos. Lo único que necesito saber es si este tipo de viviendas puede contar con un seguro de hogar al igual que cualquier otra.

La paja embalada es un material que tiene muy buenas propiedades como aislamiento térmico y acústico. Ensayos realizados en varias universidades de todo el mundo han determinado que también tiene buenas propiedades estructurales. Aún así, se suele utilizar como simple material de cerramiento sin que tenga que soportar más peso que el suyo propio.

Los mayores riesgos que podría correr este material son el fuego y la pudrición. Ambos riesgos son perfectamente evitables con una correcta ejecución y mantenimiento. Que llegue a arder la paja sólo es posible si el material de recubrimiento aplicado no ha cubierto todas las zonas de paja de la pared. Existen ensayos de laboratorio que confirman que estas paredes tienen una resistencia al fuego de 120 minutos, valor exigible en muchas de las construcciones actuales.

La pudrición de la paja es un factor muy delicado pero siguiendo unas normas a la hora de la construcción y un correcto mantenimiento durante su vida, puede llegar a durar tanto como los materiales de las construcciones actuales.

Espero que les haya aclarado lo que necesitaban para poder decirme si es posible asegurar una de estas viviendas.

Muchas gracias. Un saludo.

Javier Carro

Desde el Área de contratación de esta Compañía nos indican que, una vivienda de estas características podría asegurarse, puesto que en la información que nos facilita se asimila el material que menciona a los mismos riesgos que una construcción de obra habitual.

Reciba un cordial saludo

26/12/06 – Texto enviado a: John Straube

Hello Mr. Straube:

My name is Javier Carro and I'm a student of Technical Architecture from Spain. I can't remember if I have written an e-mail to you because I have written to a lot of people related with the construction with straw bales.

I'm developing the project to finish my degree. This project is about the construction with straw bales. At this time, I'm reading the book "design of straw bale buildings" written by Bruce King with the collaboration of several experts, and you are one of them. I want to ask you some questions about the chapter you have written:

1. on page 155 you say that a bale of 24 inch (600 mm) has 2 to 4 US perms. I would need to know this value in (mmHg m² day/gram cm.).

2. I would like to know the way to convert US perms to metric perms and metric perms to mmHg m² day/gram cm

I hope that you have no problem about what I tell you.

Thank you very much. Best regards.

Javier Carro

Hi Javier

I have received your messages, but as it is the holidays, and hardly a critical issue, I have not yet had time to respond. It would take me 15 minutes to do the conversion, but it would be good practise for you to do this yourself. One US perm is 57.3 metric perms = 57.3 nanograms of water vapor per square meter of area per second per Pascal of vapor pressure difference or ng/(Pa s m²)





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

You units, mmHg m2 day/gram cm suggest a permeability value not a permeance. Permeance is Permeability times thickness. All you need to do is convert mmHg of vapor pressure to Pascals, grams to nanograms, days to seconds. The cm is the base thickness, I think, which needs to be changed to the thickness of the layer you are talking about to make it permeance, not permeability.

PS. Use my gmail address as it is the most reliable.

29/12/06 – Texto enviado a: John Straube

Hello Mr. Straube.

Thanks for your answer. (sorry, my English is not very good)

I have tried to do the conversion but I don't know if I have done it well. I tried to convert the permeability of a lime-cement plaster (1:1:6) which has 7,3 ng/Pa s m. In 1 cm: $7,3/0,01 \text{ m} = 730 \text{ ng/Pa s m}^2 = 63\,072\,000 \text{ ng/Pa day m}^2 = 63,07 \text{ grams/Pa day m}^2 = ? = 63,07 \text{ grams}/0,0075 \text{ mmHg day m}^2 = 8403 \text{ grams/mmHg day m}^2$ (permeability) = 0,000119 mmHg day m2/gram (this is the inverse to the permeability)(resistivity)

I have attached you a picture of the software I'm using to the condensations in a straw bale wall. I would like that you comment it to me when I have the definitive data. I would like to get your opinion in the case of a condensation near the external face. Here, In Galicia (Spain) there is a lot of humidity. The average of the year is about the 80% (I'm not sure but I think it's more or less correct. I can confirm it to you)

The more important data to me is the resistivity of 1 centimetre of the straw bale. I have tried to calculate this (like the resistivity of the plaster) and the result is 0,0000087 mmHg m2 day/ gr

I hope you answer me.

Thank you very much and ¡Merry Christmas!

Javier Carro

Hi

Your English is fine.

I tried to checked your numbers. I tried to convert the permeability of a lime-cement plaster (1:1:6) which has 7,3 ng/Pa s

In 1 cm: $7,3/0,01 \text{ m} = 730 \text{ ng/Pa s m}^2 = 63\,072\,000 \text{ ng/Pa day m}^2$: where did the cm units go?

= 63,07 grams/Pa day m2 :NO. One nanogram is 1×10^{-9} grams, not 1×10^{-6} . : So 0.063 grams/Pa day m2 per cm thickness

= ? = $0.06307 \text{ grams}/0,0075 \text{ mmHg day m}^2 = 8.403 \text{ grams/mmHg day m}^2$ (permeability) = 0,119 mmHg day m2/gram (this is the inverse to the permeability)(resistivity)

However, the program you are using is steady state. This is not very useful for SB construction as the storage capacity of the stucco and straw is very large. Hence, it will requires days or weeks of steady conditions to reach equilibrium and make your calculations valid. This never happens in normal walls.

A dynamic approach must be used. I have used WUFI many times with excellent comparison to real walls. See www.wufi.de. Unfortunately, you would need a professional version. See attached paper. See also the attached chapter on how steady state calculations may be used with more accuracy.

I don't much about your climate, but I do know that VAPOUR IS ALMOST NEVER THE PROBLEM with strawbales. It is liquid water in the form of rain, floods, leaks, and ground wetness that cause almost all the problems. With a flow through system with storage, such as SB, vapour diffusion and condensation simply does not play much of a role.

30/12/06 – Texto enviado a: John Straube

Hello Mr. Straube.

Thanks for your answer but I think that I won't use the software of Wufi because I think that it is complicated. I will use the software I have sent to you and I will make the opportune comments.

I would like to know your opinion about a matter:

Here, in Galicia, It is usual a Relative Humiditi inside about the 70% or 80%, like the picture I have sent to you. In this case, it is very provable that interstitial condensations exist. On the other hand, either the kitchen





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

or the bathroom is a room with a lot of humidity, a little superior to that of the rest of the house. Here, in the ordinary construction, we use enameled ceramic in order to avoid a damage of the wall due to the amount of water vapour. I know that a straw bale wall must be breathable to the inside and to the outside. I wonder if it would be possible to use enameled ceramic in the bathroom or in the kitchen in order to get two things:

- to avoid a superficial damage and to facilitate the cleaning
- to avoid interstitial condensation

I wonder if it would be possible to use a vapour barrier in all the wall in the internal face in order to avoid the water vapour inside go to outside through the wall. In this case, the wall can breath only to outside.

Thank you very much. Yours sincerely

Javier Carro

Yes, I know WUFI is complicated. The challenge is that steady state is not that accurate.

On the question of humidity. From what I see on the internet, your climate is not that different from many others I have worked in. There is no reason to expect or tolerate 80% RH in a building for any length of time! Only special uses structures like wine cellars have this high. We normally experience problems with sustained interior RH og over 65% or so, regardless of what the building is made of. If the RH is this high something is wrong with how the building is being operated. Short-term variations of 15 min to a few hours, don't affect SB walls much. SB walls work by allow vapour to flow through, in to out, or out to I depending on the climate. Unless you have a climate in which the temperature gradient is always strongly in one direction, vapour barriers are dangerous. In your climate NO vapour barrier should be used!!! Steady state calcs that show VB are needed are usually wrong.

In North America we use a lot of vapour barriers in wood frame construction. Many people tried to use VB in the early days of strawbale, and they created many failures. For the last 5 or more years, very few SB have been made with VB in almost all climates, and the results have been good. In your climate, given the effects of solar radiation, the walls are likley to dry to the inside more often than it dries to the outside, but both directions are important.

Again, the biggest problems to worry about are not vapour but rain.

03/01/06 – Texto enviado a: John Straube

Thanks for your opinion. I will keep it in mind.

I continue having the doubt about the humid locals. Here, we have a VB in the humid locals like the Kitchen or the bathroom. Right now, I am not thinking of the straw, but I am thinking in the plaster. When we have a shower, we generate a lot of vapour. This vapour is in contact with the plaster every week, every month,... and the plaster should be cleaned. I think that the bath, in this case, would have a growth of molds. It won't happen if there is a vapour barrier in the surface, like a tile. Don't you agree?

If the wall dries to the inside, the relative humidity is rising. Is it a problem if we already have a hight relative humidity?

Thank you very much

Javier Carro

Hi there again

Can you not find local data for temperature and humidity? This is usally published. Compare to, say, San Francisco area for something I think is like your climate. Then compare to Dallas Texas or Huntsville Alabama - these are humid areas and have many succesful SB buildings.

Your concern is interior vapor. Interior vapor should be removed by ventilation. IF you apply a vapor barrier to the interior of a SB wall, water is very likely to condense on the exterior surface of the interior VB and cause mold growth, rot of straw, and softening of earthplasters. Almost all SB buildings in north America no longer use VB because of this widely observed problem. The problem also occurs in wood frame buildings to a lesser extent. The problem does not occur with masonry buildings. Tvapor in bathrooms and kitchens must be dealt with by ventilation. The concern in bathrooms is liquid water. The normal approach in these rooms has been to place tiles on a board with an air gap ventilated to the interior behind the tiles and in front to the SB. We have definitely seen lots of problems in bathrooms behind tiles in both strawbale and





APÉNDICE 1 – CORRESPONDENCIA MANTENIDA

wood frame walls. Inward drying does not increase the RH. The rate of inward drying is very small relative to the rate of ventilation removal, and so has essentially no effect in a functional building.

Note that much of what I am saying is not opinion, it is fact and/or physics. My profession of building physics is all about avoiding opinions of "I think I should" and providing science and fact based answers.

06/01/06 – Texto enviado a: John Straube

Hello Mr. Straube.

I have attached the data from the place that I'm using to the the simulation of the house of my investigation. I will try to get the data from the places you have said to me to compare it with the data that I send you.

Yours sincerely

Javier Carro

Good data!

Looks like you live in a very nice climate. Wish I were there. Remember RH outside depends dramatically on temperature. RH in morning is usually high (very often over 80% in many temperate climates like yours) and high in cold weather (like here, now-- when the temp goes under 5 C, the RH is over 90% almost all the time). At the end of the day, the temps are high and the RH are low (like under 60 to 70%. Desert areas have very low RH often although even they have high RH at night because of the large temperature swings.

13/01/06 – Texto enviado a: John Straube

Hello Mr. Straube:

I would like to know your opinion about a matter. I'm thinking in the possibility of a strawbale wall without plaster inside. I'm thinking in an air gap between the bales and a panel of gypsum (15 mm.). It is a panel of gypsum, 13 mm. thick, with two cardboard sheets. It would be a possibility in order to avoid the time of the plaster and to fasten the execution of the wall.

I know that the air in contact with the straw is a problem because it facilitates the growth of microbes.

Thank you very much

Some people have tried this. It reduces the thermal performance and fire performance and structural performance a lot. I never recommend it and in fact Bruce King always describes walls as plastered strawbale. The benefits of plaster are very big.



Apéndice 2

CONSULTORES DEL ESTUDIO



APÉNDICE 2 – CONSULTORES DEL ESTUDIO

Durante los meses que ha durado esta investigación, fueron muchas las personas que me han aportado su colaboración facilitándome información e incluso asesorándome. Por lo general son personas que dedican parte de su tiempo a investigar la construcción con balas de paja o a promover su uso a través de distintos medios. A todas esas personas les estoy muy agradecido, en especial a John Straube y a César Lema, que han dedicado parte de su tiempo a compartir información conmigo.

A continuación procedo a describir brevemente a algunas de esas personas que tienen relación con la construcción con balas de paja y con las que he mantenido contacto durante esta investigación.

John F. Straube

El Doctor Straube es miembro del Departamento de Ingeniería Civil y profesor adjunto de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Waterloo, Ontario (Canadá), en donde imparte clases de ciencia de los materiales, diseño estructural y tecnología de la construcción, tanto en el campo de la edificación como en el de la obra civil. Ha estado ampliamente involucrado en las áreas de diseño de cerramientos de edificios, propiedades físicas de la humedad, y comportamiento general de los edificios como especialista, investigador y educador. Sus investigaciones se centran en diseños de edificios energéticamente eficientes, saludables, duraderos y sostenibles. Algunas de las investigaciones que ha realizado incluyen el control del agua de lluvia, ventilación, métodos de aislamiento térmico, materiales alternativos para la construcción, barreras de vapor o crecimiento del moho.

Como conferenciante, son muchos los países por los que ha divulgado sus conocimientos, acudiendo a conferencias para tratar, sobre todo temas de humedades y comportamiento de las edificaciones ante la humedad. También ha publicado numerosos artículos en varias revistas, la mayoría relacionados con los temas de las edificaciones y la humedad.

Es miembro de distintas organizaciones como *National Institute of Building Sciences*, *Building Environmental and Thermal Council*, *American Society of Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*, *Ecological Building Network*, *U.S. Department of Energy* o *Committee for Oak Ridge National Labs*. Además es crítico de informes técnicos para varias agencias gubernamentales (Canada Mortgage and Housing Corporation, US Department of Energy), de trabajos para varias revistas técnicas (*American Society of Heating, Air-conditioning and Refrigeration Engineers Transactions*, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*) y de conferencias.

Kelly Lerner

Es la propietaria de *One World Design Architecture* desde el año 1997. Ésta es una firma de diseño residencial centrada en soluciones saludables y sostenibles utilizando materiales naturales para viviendas energéticamente eficientes. Kelly Lerner es una Arquitecta licenciada en California (2002) y Washington (2005) y recibió el Master en Arquitectura por la Universidad de Oregón (1994).

Después de licenciarse, Kelly viajó a China, Mongolia y Argentina construyendo viviendas y edificios públicos utilizando materiales naturales. Recibió el premio *2005 World Habitat Award at the United Nations* por su trabajo en el *Chinese Straw-Bale Energy Efficient Housing Project*. Está clasificada dentro de los "Top Ten Green Architects 2005" por el *Natural Home and Garden Magazine*.

Trabajando con la *Adventis Development and Relief Agency (ADRA)* inició la introducción de la construcción de balas de paja en China y construyó de 607 viviendas de balas de paja y 3 escuelas de balas de paja en cinco provincias del noreste. Desarrolló un sistema simple innovador de refuerzo para construcciones de balas de paja en zonas de elevada actividad sísmica.

En Argentina trabajó con Arquitectos locales en el diseño de las primeras residencia y clínica de balas de paja del país. Un trabajo similar realizó en Mongolia además de participar activamente en la formación de más de 100 constructores de la zona.

Ha publicado numerosos artículos en revistas y publicaciones especializadas, además de ser miembro de organizaciones como el *California Straw Building Association*, *Northwest Exo-Building Guild*, *Architects/Designers for Social Responsibility* o *Builders Without Borders*.





APÉNDICE 2 – CONSULTORES DEL ESTUDIO

Bruce King

Bruce King es un ingeniero que realiza su actividad profesional en Sausalito, California. Es autor de varios libros como *Buildings of Earth and Straw: Structural Design for Straw Bale and Rammed Earth Architecture* (1996) o *Design of Straw Bale Buildings* (2006). Es fundador, junto con su esposa Sarah, de la *Green Building Press*, además de ser el fundador y el director de la *Ecological Building Network*, una organización sin ánimo de lucro. Ha sido el receptor del premio *Big Head Award for Excellence in Furthering the Understanding of Ecological Building*, otorgado por la *California Straw Building Association*. Además ha sido investigador en la Universidad de Newcastle, New South Wales, en Australia.

John Glassford

En el año 1996, John Glassford realizó varios ensayos de resistencia a compresión, resistencia al viento y ensayos de asiento en paredes de balas de paja. Fue el primero en realizar ensayos en paredes de balas de paja en Australia. Dichos ensayos fueron realizados en el *Building Research Institute* de la *University of New South Wales*, bajo la dirección de John Carric.

En el año 2002 creó la AUSBALE (*Australian and New Zeland Straw Bale Association*). La primera medida de esta asociación fue organizar la *2002 International Straw Bale Building Conference* en Wagga. Esta asociación ha realizado investigaciones de resistencia estructural en paredes de balas de paja, resistencia al fuego y comportamiento higrotérmico.

John Glassford continúa investigando y desarrollando técnicas de construcción con balas de paja, y *Huff 'n' Puff Constructions* son considerados líderes en este campo, no solamente en Australia sino en todo el mundo.

César Lema

César Lema es licenciado en Ciencias Biológicas, en la especialidad vegetal, por la Universidad de Santiago de Compostela. En el año 1995 se hizo Doctor en Ciencias Biológicas tras presentar su tesis titulada “Ecología de las Comunidades de Levaduras Viníficas en O Baixo Miño”, obteniendo la calificación de Apto Cum Laude por el área de microbiología de la Universidad de Vigo. Fue merecedor de distintas becas pre y postdoctoral, tanto dentro de la comunidad autónoma como fuera de ella, entre las que destacan varias por el instituto de enología de Burdeos (Francia). Ha participado también en distintos proyectos de investigación relacionados con el tema de sus tesis.

Cuenta con experiencia docente en la Universidad de Vigo entre los años 1993 y 1995, impartiendo clases teóricas y prácticas en asignaturas como Microbiología, Complementos de Microbiología o Higiene de los Alimentos. Ha escrito artículos para publicaciones como el *Journal of Dairy Research*, *VV-Viticultura*, *Viticultura/Enología Profesional*, *American Journal of Enology and Viticulture* o *EcoHabitar*.



Apéndice 3

PROCESO DE EJECUCIÓN DE UNA PARED EN VEDRA

APÉNDICE 3 – PROCESO DE EJECUCIÓN DE UNA PARED EN VEDRA

En este apartado se va a poder ver cómo se han utilizado las balas de paja para construir una pared en una rehabilitación de una vivienda antigua con muros de mampostería. La pared fue construida con la finalidad de cerrar un espacio anexo a la vivienda y que antiguamente estaba simplemente cubierto, destinado a guardar herramientas del campo. La construcción se realizó en Vedra en el mes de Julio del año 2005, y fue materializada por dos Arquitectos Técnicos, Teresa y José Antonio, con la ayuda de sus familiares. Estas personas han mantenido ese principio de la construcción con aportación del trabajo desinteresado de personas, principio presente en muchas de las construcciones con balas de paja realizadas en todo el mundo.

La pared que construyeron era de reducido tamaño, además de que incorporó una ventana. Las balas de paja empleadas fueron pocas, eran de dos cuerdas y se almacenaron en el propio espacio cubierto.

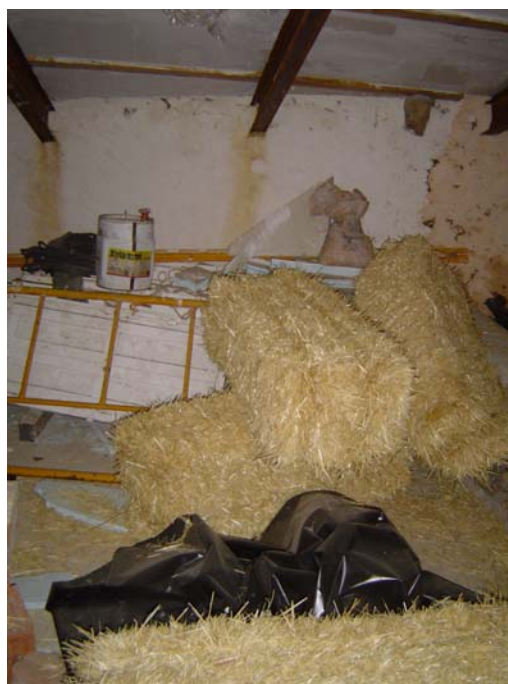


Fig. Ap3.1- Balas de paja utilizadas para la construcción de la pared

La zona en la que se realizó la pared es la que está al fondo de la imagen. A la complicación de trabajar en una pared de tamaño reducido y con una ventana hay que sumarle la inclinación que tiene que tener dicha pared en la parte superior para adaptarse a la pendiente de la cubierta.



Fig. Ap3.2- Madera a utilizar para la fijación de la ventana a la estructura

APÉNDICE 3 – PROCESO DE EJECUCIÓN DE UNA PARED EN VEDRA

El primer paso fue fijar la ventana a la base y a la coronación mediante maderos. Estos maderos servirán también para la fijación de la malla metálica que se colocará por cada cara de la pared.



Fig. Ap3.3- Fijación de la ventana a la estructura

El siguiente paso fue modificar algunas balas para poder colocarlas en su sitio. Las balas fueron perforadas con un elemento metálico para poder realizar un nuevo atado con la futura dimensión de la bala. Una vez realizado este atado se procedió a cortar las ataduras originales. Este procedimiento fue necesario para modificar la longitud de la bala, pero en algún caso también hubo que modificar el ancho de ésta. En este caso lo único que se hizo fue recortar la bala en sentido perpendicular a las fibras. Las personas que realizaron esta operación reconocen que no es sencillo recortar una bala de paja, incluso con motosierra.



Fig. Ap3.4- Modificación de las balas de paja

Al fondo de la imagen se puede ver una pared en la que existe una franja de color distinto al resto. Esta franja se corresponde con la zona en la que va a ir la nueva pared de balas, y el color es de pintura impermeable al agua. En otra situación sería necesario insertar en la pared existente algún elemento de conexión con la nueva pared de balas pero en este caso, y a causa del escaso tamaño y exposición de la pared nueva, los propietarios consideraron innecesaria esta fijación.

APÉNDICE 3 – PROCESO DE EJECUCIÓN DE UNA PARED EN VEDRA

En la base del muro se insertaron redondos de acero en sentido vertical para la fijación de las balas. También se efectuó una fijación en sentido horizontal, pero en este caso con listones de madera.



Fig. Ap3.5- Clavado de los listones en las balas



Fig. Ap3.6- Colocación de la malla metálica



Fig. Ap3.7- Recorte del sobrante

Una vez colocadas y fijadas todas las balas se procedió a la colocación por el exterior de una malla metálica. La malla se clavó a los maderos existentes, y además de para refuerzo del recubrimiento servía para facilitar la tarea posterior de enfoscado. Un correcto agarre entre el mortero y la paja requiere tiempo y esfuerzo, mientras que con la malla se facilita mucho el proceso.

APÉNDICE 3 – PROCESO DE EJECUCIÓN DE UNA PARED EN VEDRA



Fig. Ap3.8- Listón de madera fijado



Fig. Ap3.9- Listón de madera fijado

Ocultando la línea de clavazón de la malla, y determinando la zona a aplicar el recubrimiento, se fijó mediante tirafondos un listón de madera de 1,5 cm. de espesor.



Fig. Ap3.10- Listones a la espera de ser

Los listones de madera sirvieron de marco al recubrimiento que se le aplicó a la pared. La primera capa fue de mortero de cemento Pórtland, cal y arena.



Fig. Ap3.11- Enfoscado de mortero de cemento, cal y arena

APÉNDICE 3 – PROCESO DE EJECUCIÓN DE UNA PARED EN VEDRA



Fig. Ap3.12- Pared con parte del enfoscado aplicado

La primera capa de mortero que se aplicó fue de mortero mixto empleando cemento Pórtland. En este caso se le quiso dar una segunda capa de mortero mixto, pero esta vez con cemento blanco, para alcanzar el aspecto del que se aprecia en el muro de mampostería a la derecha de la imagen.

En esta imagen se aprecia perfectamente la forma compleja que presenta la pared. En situaciones así, el empleo de balas de paja supone una desventaja sobre otras opciones más manejables y con mayor facilidad para ajustarse a esta forma, como puede ser el ladrillo cerámico. A pesar de esto, los propietarios quisieron que fuera así para experimentar con las balas de paja como material de construcción.

Apéndice 4

EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



PROPIETARIOS: Félix y Ángeles

LUGAR: Alicante

USO: Vivienda

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2003-2004

TIPOLOGÍA: Estructura auxiliar

ENFOSCADO: Cemento/cal/arena (1/3/5)

Foto facilitada por Rikki Nitzkin



Foto facilitada por Rikki Nitzkin

PROPIETARIOS: Ixchel, Carlos, Arantxa y Karmen

ARQUITECTO: Iñaki Urkiya

LUGAR: Fleix, Alicante

USO: Vivienda

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2000-2001

TIPOLOGÍA: Muros portantes

ENFOSCADO: Arena/paja/arcilla

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



Foto facilitada por Rikki Nitzkin

PROPIETARIOS: Elías, Milan, Swami y Rada

LUGAR: Ávila

USO: Cocina comunal

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2001

TIPOLOGÍA: Estructura auxiliar

ENFOSCADO: Arcilla con paja picada



Fotos facilitadas por Rikki Nitzkin



PROPIETARIOS: Ixchel, Carlos, Arantxa y Karmen

LUGAR: Ávila

USO: Vivienda

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2004

TIPOLOGÍA: Muros portantes

ENFOSCADO: Arcilla con paja y lechada de cal

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



LUGAR: Cádiz

USO: Para visitas

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2004-2005

TIPOLOGÍA: Muros de carga y estructura auxiliar

ENFOSCADO: Arcilla/paja/arena y revoco de cal

Foto facilitada por Rikki Nitzkin



Fotos facilitadas por Rikki Nitzkin



PROPIETARIO: Alfonso Flaquer

LUGAR: Girona

USO: Taller para impartir cursos

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2001-2005

TIPOLOGÍA: Estructura auxiliar

ENFOSCADO: Arcilla y cal

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



Foto facilitada por Rikki Nitzkin

PROPIETARIOS: Maren Termens y Raimon Costa
LUGAR: Girona
USO: Almacén de herramientas
FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2004
TIPOLOGÍA: Muros de carga
ENFOSCADO: Arcilla, arena, paja picada, copos de madera y cereal fermentado



Foto facilitada por Rikki Nitzkin

PROPIETARIOS: Toni y Mirit Webb
LUGAR: Lanjarón, Granada
USO: Vivienda
FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2002
TIPOLOGÍA: Estructura auxiliar
ENFOSCADO: 1ª arcilla/arena. 2ª cal/arena (1:6). 3ª cal/cemento blanco (7:3) aplicado con brocha



Foto facilitada por Rikki Nitzkin

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



Foto facilitada por Rikki Nitzkin

PROPIETARIO: Lluís Miró Besó
LUGAR: Juneda, Lleida
USO: Vivienda
FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2004-2005
TIPOLOGÍA: Muros portantes con pilar para viga de cumbrera
ACABADOS: Exterior- Tablas de madera machihembrada sobre membrana impermeable y transpirable
Interior- Tableros aglomerados de madera



Fotos facilitadas por Rikki Nitzkin

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



PROPIETARIA: Rikki Nitzkin
ARQUITECTO: Iñaki Urkiya
LUGAR: Pallars Jussà, Lleida
USO: Vivienda
FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2002
TIPOLOGÍA: Muros portantes y estructura auxiliar
ENFOSCADO: 1ª arcilla/paja. 2ª arcilla/arena

Foto facilitada por Rikki Nitzkin



PROPIETARIO: David Ripoll
LUGAR: Yecla, Murcia
USO: Vivienda
FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2005
TIPOLOGÍA: Estructura auxiliar
ACABADOS: Cal/arena (1:3)

Fotos facilitadas por Rikki Nitzkin



APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



LUGAR: Armescua baja, Navarra
USO: Vivienda
FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2004
TIPOLOGÍA: Muros portantes
ENFOSCADO: Cal/arena

Foto facilitada por Rikki Nitzkin



PROPIETARIOS: Richard Wade e Inés Sánchez
LUGAR: Cornudella de Monstsant, Tarragona
USO: Alojamiento para estudiantes
FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2001
TIPOLOGÍA: Estructura auxiliar
ACABADOS: -Interior: cal/arena
-Exterior: cal/cemento/arena

Fotos facilitadas por Rikki Nitzkin



APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



Foto facilitada por María Molina

PROPIETARIA: María Molina

LUGAR: Teruel

USO: Vivienda

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 2004

TIPOLOGÍA: Estructura auxiliar

ACABADOS: Cal/arena/cemento blanco



Fotos facilitadas por Rikki Nitzkin



PROPIETARIOS: Roger

LUGAR: Granada

USO: Centro Budista

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



PROPIETARIOS: A.N.D.R.E.A. (Asociación)

LUGAR: Barro, Pontevedra

USO: Cobertizo

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: Julio 2006

TIPOLOGÍA: Muros portantes

ENFOSCADO: Arcilla/excremento de burro/paja



INTERIOR DE VIVIENDA

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



HOTEL PIEDRAS Y OLAS (Nicaragua)



STRAW BALE STUDIO (Oxford, Michigan, 1996)

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



INTERIOR DE VIVIENDA



VIVIENDA DE BALAS DE PAJA

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



MAISON EN PAILLE DE PASCAL THEPAUT (Bretaña Francesa) [Nature Progres – 2005]



VIVIENDA DE BALAS DE PAJA DE DOS PLANTAS DE ALTURA CON ESTRUCTURA DE MADERA

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



VIVIENDA DE BALAS DE PAJA



VIVIENDA DE BALAS DE PAJA

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



S-HOUSE (Austria, 2005)



TURTLE MOUNTAIN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTER (Dacota del Norte, 2004) [Nathaniel Corum, op. cit.]

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



CROW NATION COMUNITY STUDY HALL (Montana) [Nathaniel Corum, op. cit.]



NORTERN CHEYENNE RESERVATION (Montana) [Nathaniel Corum, op. cit.]

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



PINE RIDGE RESERVATION (Dakota del Sur) [Nathaniel Corum, op. cit.]



POEM'S HOUSE

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



CROW RESERVATION (Montana) [Nathaniel Corum, op. cit.]



NORTERN CHEYENNE RESERVATION RESERVATION (Montana) [Nathaniel Corum, op. cit.]

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



CASA DE PAJA (<<http://www.agapecommunity.org>>)



NORTERN CHEYENNE LITERACY CENTER (Montana) [Nathaniel Corum, op. cit.]

APÉNDICE 4 – EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES



CASA DE PAJA (Australia)



CASA DE PAJA (Irlanda) [<http://www.strawbale-building.co.uk>]

Apéndice 5

PÁGINAS WEB
CONSULTADAS



APÉNDICE 5 – PÁGINAS WEB CONSULTADAS

www.casasdepaja.com	www.nawaro.com
www.thelaststraw.org	www.bre.co.uk
www.strawbalefutures.or.uk	www.greenbuildingpress.com
www.ecobuildnetwork.org	www.ecohouse-strawbale.com
www.dcat.net	www.arquitecturaenfardos.cl
www.strawbalecentral.com	www.acoustics.org
www.builderswithoutborders.com	
www.epsea.org	
www.gea_es.org	
www.revistanatural.com	
www.tallerkaruna.org	
www.ecohabitar.org	
www.agrodesierto.com	
www.grisb.org	
www.buildinggreen.com	
www.coloradostrawbale.org	
www.strawbuilding.org	
www.sen.ca.gov	
www.chelseagreen.com	
www.io.com	
www.sustainable.doe.gov	
http://mha-net.org	
www.fasba.de	
www.lamaisonenspaille.com	
www.ecobusinesslinks.com	
www.global2000.at	
www.landerland.com	
www.uws.edu.au	
www.schl.ca	
www.dsaarch.com	
www.caneloproject.com	
www.navajo.org.uk	
www.glassford.com.au	
www.one-world-design.com	
www.coloradostrawbale.org	
www.ausbale.org	
www.strawbalebuilding.ca	
www.s-house.at	



Apéndice 6

BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA



APÉNDICE 6 – BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA

- 1- Bruce King. Design of straw bale buildings. 1ª edición. San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Año 2006. 260 p. ISBN: 0-9764911-1-7
- 2- Bruce King. Buildings of Earth and Straw. Sausalito, California. Editorial: Ecological Design Press. Año 1996. 169 p. ISBN: 0-9644718-1-7
- 3- Nathaniel Corum. Building a Straw Bale House: The Red Feather Construction Handbook. Primera edición. New York: Princeton Architectural Press, 2005. 181p. ISBN 1-56898-514-2
- 4- André de Bouter. Bâtir en Paille: Guide pratique de la construction en bottes de paille. 2ª edición. Champmillon, France. Editorial: La maison en Paille. Año 2006. 101 p. ISBN: 2-9522653-1-3
- 5- Barbara Jones. Information Guide to Straw Bale Building [on line]. Amazon Nails, 2001. Disponible en web: <http://www.strawbalefutures.org.uk>
- 6- Athena Swentzell et al. The Straw Bale House: Designing and Building With a Resource-Efficient Material (traducción al Español). Chelsea Green Publishing Company, 1994. 300 p. ISBN 0930031717
- 7- S. O. MacDonald. Una introducción visual a la construcción con fardos de paja, 1999 (versión en Español). 22p.
- 8- U.S. Department of Energy. House of Straw – Straw Bale Construction Comes of Age. Abril de 1995. Disponible en web: <<http://www.eren.doe.gov>>
- 9- Lynne Elizabeth y Cassandra Adams. Alternative Construction: Contemporary Natural Building Methods. New York, mayo 2000. 416 p. ISBN: 0471249513
- 10- Leanne R. Marks. Straw-bale as a viable, cost effective and sustainable building material for use in southeast Ohio. Thesis presented to the faculty of the college of Arts and Sciences of Ohio University ,2005. 118p.
- 11- Patricia Cebada y Rubén Solsona. Casas Sanas y Ecológicas con Muros de Paja – 2005. 92p.
- 12- Elizabeth Wilhide. ECO. 1ª edición en lengua española. Barcelona. Editorial Blume, 2004. 184p. ISBN:84-95939-77-0





APÉNDICE 6 – BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA

13- F. Javier Neila González. Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible. Madrid. Editorial Munilla-Lería. Marzo 2004. 443 p. ISBN-84-89150-64-8

14- José Antonio González González. Arquitectura Bioclimática. Colegio de Arquitectos de Galicia, Diciembre de 1997. 109 p. ISBN: 84-85665-28-7

15- Rafael Serra. Arquitectura y climas. 2ª edición. Barcelona. Editorial Gustavo Gili, S.A. año 2000. 94p. ISBN: 84-252-1767-9

16- David Pearson. El libro de la casa natural. 3ª edición. Barcelona, 2000. Ed. RBA libros. 286 p. ISBN: 84-7901-023-1

17- Francisco Azconegui Morán et. al. Guía práctica de la cal y el estuco. 1ª edición. León, 1998. Editorial de los oficios. 216 p. ISBN: 84- 930427-0-6

18- M. Villarrubia y L. Jutglar. Arquitectura solar pasiva. Ahorro energético en calefacción. Facultad de física. Universidad de Barcelona, Febrero de 1999. Disponible en web: <<http://www.energuia.com>>

Publicaciones en serie

19- EcoHabitar. Nº11. Otoño de 2006. Olba, Teruel. Ed. ECOHABITAR S.L. ISSN:1697-9583

20- Luís Lázaro. Bioconstrucción con balas de paja [on line]. Madrid, 4 de Julio de 2005. [Consulta: 17 Agosto de 2006]. Disponible en web: <http://www.revistanatural.com>

21- The Last Straw Journal. Lincoln Nebraska. The Green Prairie Foundation for Sustainability,1994. Disponible en web: <http://www.thelaststraw.org/contact/html>

22- Lamond, W.J. y Graham, R. The Relationship Between the Equilibrium Moisture Content of Grass Mixtures and the Temperature and Humidity of the Air. Journal of Agricultural Engineering Resources, 1993. 335 p.

23- Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Superficies y producciones agrícolas. Agosto de 2005. Disponible en web: <http://www.mapya.es/es/estadistica/pags/superficie/superficie.htm>

24- Xunta de Galicia – Consellería de Medio Ambiente. Anuario Climatológico de Galicia 2004. 118 p. ISBN: 84-453-3962-1

25- Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning. California, 1997. Disponible en web: <http://ob.arb.ca.gov/smp/rice/aac/aac.htm>





APÉNDICE 6 – BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA

26- Report of the Advisory Committee on Alternatives to Rice Straw Burning. California, 2001. Disponible en web: <http://ob.arb.ca.gov/smp/rice/aac/aac.htm>

Publicaciones técnicas consultadas

27- Linh Vuong. Straw Bale Construction in China: a comparison of obstacles between Northern and Southern rural areas for the use of Straw Bale Construction as an energy efficient building alternative [on line]. University of Puget Sound, Washington, julio 2004. [Consulta: 26 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.stawbalebuilding.ca>

28- Linda Zhu. Straw Bale Ecological Housing Program [on line]. ADRA China, 2005. [Consulta: 26 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.stawbalebuilding.ca>

29- Matthew D. Summers, Sherry L. Blunk, Bryan M. Jenkins. How Straw Descomposes: Implications for Straw Bale Construction. California, 2003. Disponible en web: <http://www.ecobuildnetwork.org>

30- Stephen Vardy and Colin MacDougal. Compressive testing and análisis of plastered straw bales [on line]. Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2005. [Consulta: 2 septiembre 2006]. Disponible en web: <http://www.strawbalebuilding.ca>

31- John Q. Zhang. Load carryng characteristics of a single straw bale under compression [on line]. Shcool of Construction, Property and Planning – Univerity of Western Sydney, Australia. [Envío de John Q. Zhang recibido el 3 de agosto de 2006].

32- Dan Smith. Creep in Bale Walls [on line]. Berkeley, California, 2003. [Consulta: 8 septiembre 2006]. Disponible en web: <http://www.dsaarch.com>

33- Michael Faine y Dr. John Zhang, University of Western Sydney, Australia. A Pilot Study examining the Strength, Compressibility and Serviceability of Rendered Straw Bale Walls for Two Storey Load Bearing Construction [on line]. Primera Conferencia Internacional sobre Estructuras de Construcciones Ecológicas, Centro Santa Sabina, San Rafael, California, Julio de 2000. [Consulta: 17 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.strawbalebuilding.ca>

34- Michael Faine y Dr. John Zhang, University of Western Sydney, Australia. A Pilot Study examining and comparing the load bearing capacity and behaviour of an earth rendered straw bale wall to cement rendered straw bale wall [on line]. Conferencia Internacional sobre Construcción con Balas de Paja, Wagga, Diciembre de 2002. [Consulta: 17 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.strawbalebuilding.ca>





APÉNDICE 6 – BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA

- 35- Peter Walker, Dept. Architecture & Civil Engineering, University of Bath. Compression Load Testing Straw Bale Walls [on line]. Mayo de 2004. [Consulta: Mayo de 2004]. Disponible en web: <http://www.strawbalebuilding.ca>
- 36- Joseph J. Bilello y Russell R. Carter. Investigation of wind-borne debris resistance of straw bale wall construction with a stucco finish [on line]. The Wind Engineering Research Center, Texas Tech University, Marzo de 1999. [Consulta: 9 Agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.strawbalebuilding.ca>
- 37- Cale Ash y Mark Ashhlein. In-Plane Cyclic Test of Plastered Straw Bale Wall Assemblies [on line]. University of Illinois. Disponible en web: <http://www.strawbalebuilding.ca>
- 38- Nehemiah Stone. Thermal Performance of Straw Bale Wall Systems [on line]. Octubre 2003. [Consulta: 10 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.ecobuildnetwork.org>
- 39- GrAT – Center for Appropriate Technology / Viena University of Technology. Heat Insulation Performance of Straw Bales and Straw Bale Walls [on line]. Viena, noviembre 2000. [Consulta: 5 septiembre 2006]. Disponible en web: <http://www.grat.tuwien.ac.at>
- 40- John Straube. Moisture Properties of Plaster and Stucco for Strawbale Buildings [on line]. Disponible en web: <http://www.ecobuildnetwork.org>
- 41- Canada Mortgage and Housing Corporation. Straw Bale Moisture Sensor Study [on line]. Canadá, 1997. [Consulta: 28 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.cmhc-schl.gc.ca>
- 42- Canada Mortgage and Housing Corporation. Straw Bale Moisture Research [on line]. Canadá, 2000. [Consulta: 28 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.cmhc-schl.gc.ca>
- 43- Canada Mortgage and Housing Corporation. Pilot Study of moisture control in stuccoed straw bale walls [on line]. Canadá, 1997. [Consulta: 28 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.cmhc-schl.gc.ca>
- 44- John Straube and Chris Schumacher. Monitoring the Hygrothermal Performance of Strawbale Walls, 2003
- 45- Carl J. Mas y E. Carr Everbach. Acoustical Characterization of Straw Bales as Structural Elements [on line]. St. Louis, Missouri. Acoustical Society of America, 1995. [Consulta: 6 septiembre 2006]. Disponible en web: <http://www.asa.aip.org>
- 46- Dan Brosted Pedersen. Maling af luftlydisolation for lerpudsede halmaegge i ejendom beliggende Kordalsvej 16, 9493 Saltum. On line. Junio de 2001





APÉNDICE 6 – BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA

47- Bob Theis. Straw Bale Fire Safety [on line]. Julio de 2003. [Consulta: 18 agosto 2003]. Disponible en web: <http://www.ecobuildnetwork.org>

48- Katrina Hayes. ASTM E84 – 98 Standard Test Method for SURFACE BURNING CHARACTERISTICS OF BUILDING MATERIALS [on line]. EEUU, mayo de 2000. [Consulta: 18 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.strawbalebuilding.ca>

49- Manuel A. Fernández. Summary Report on Straw Bale Construction Activity [on line]. Albuquerque, Nuevo México, febrero 1994. [Consulta: 22 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.dcat.net>

50- Bryce Simons. Report of Transverse Load Test and Small Scale E-119 Fire Test on Un-Coated Straw Bale Wall Panels and Stucco Coated Straw Bale Wall Panels [on line]. Albuquerque, Nuevo México, 1993. [Consulta: 22 agosto 2006]. Disponible en web: <http://www.dcat.net>

Normativa consultada

51- Draft Straw Bale Code for Inclusión in the California Building Code. 2006.

52- California Straw Bale Code. 2002.

53- California Straw Bale Code. 1995.

54- Boulder City Code (Colorado). Straw Bale Construction. 1981.

55- Clark County. Prescriptive guideline for load bearing & non-load bearing straw bale construction. September, 2003.

56- Cortez City Code (Colorado). Straw Bale Construction. 1997.

57- Nevada Straw Bale Code. 1995.

58- New México Straw Bale Code. 2003.

59- RD 312/2005

60- Código Técnico de la Edificación 2006

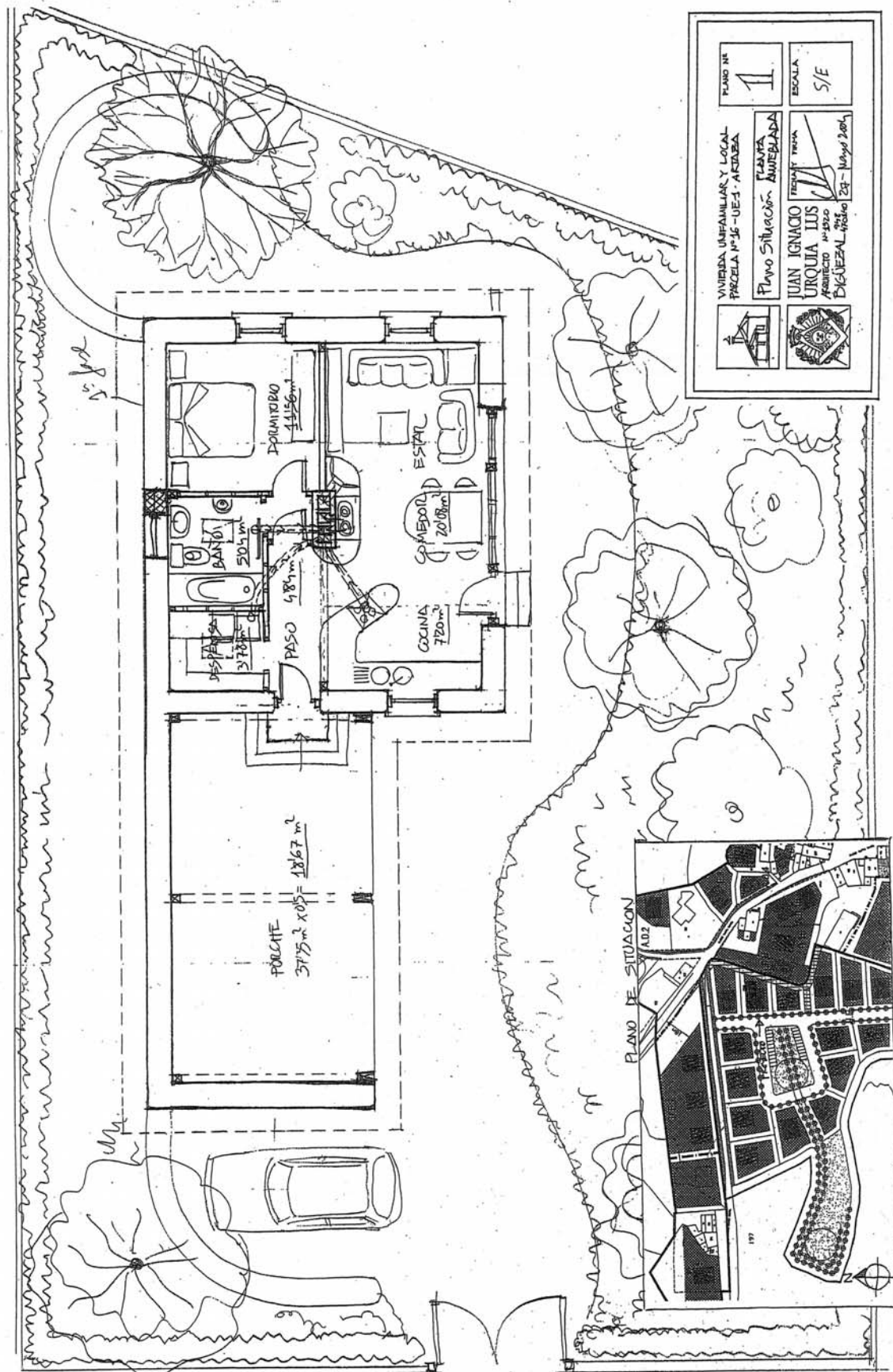
61- NBE-CA-88



Apéndice 7

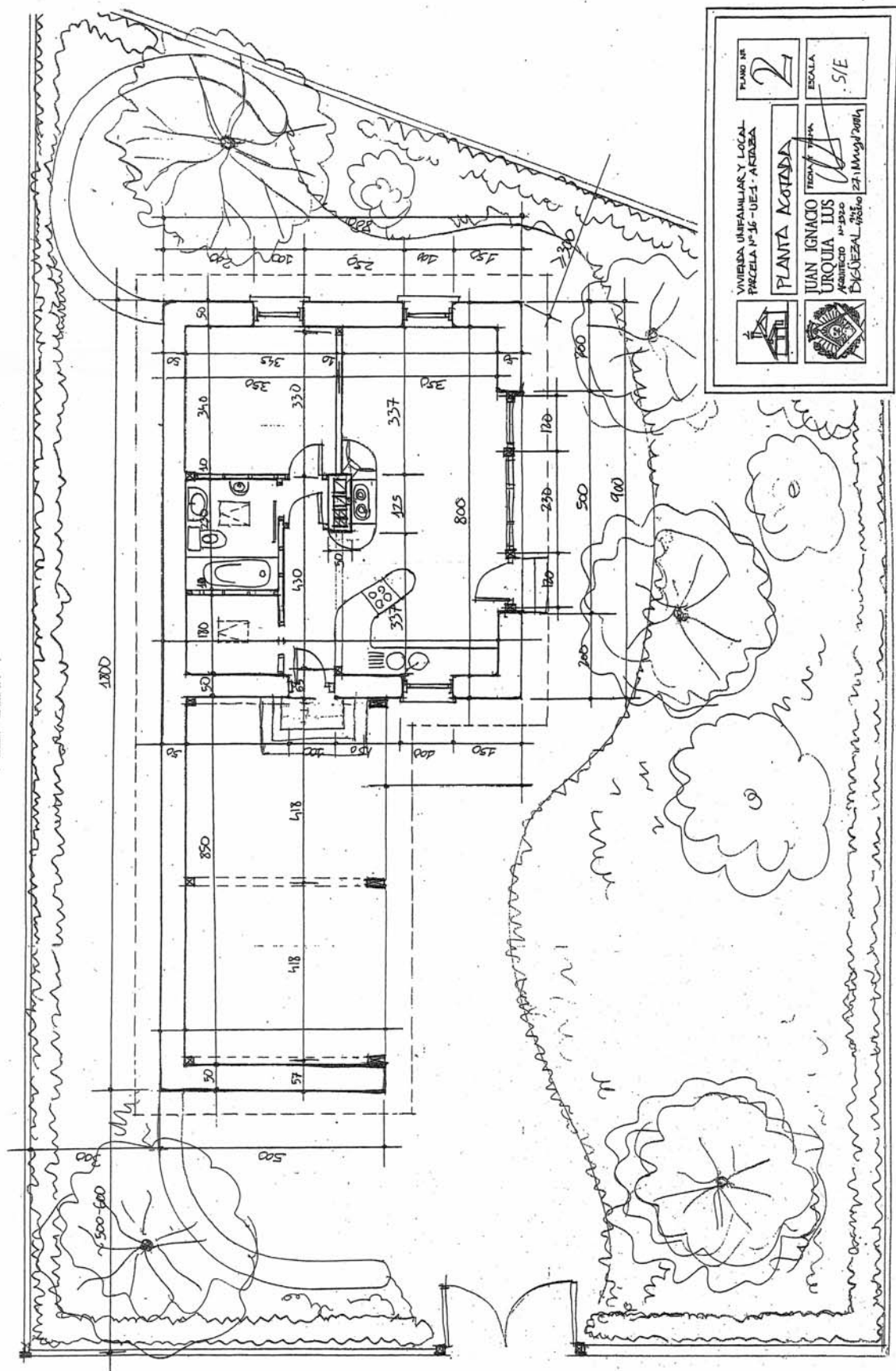
PLANOS DEL PROYECTO DE UNA VIVIENDA DE BALAS DE PAJA EN NAVARRA

FRANCISCO JAVIER CARRO CASTRO

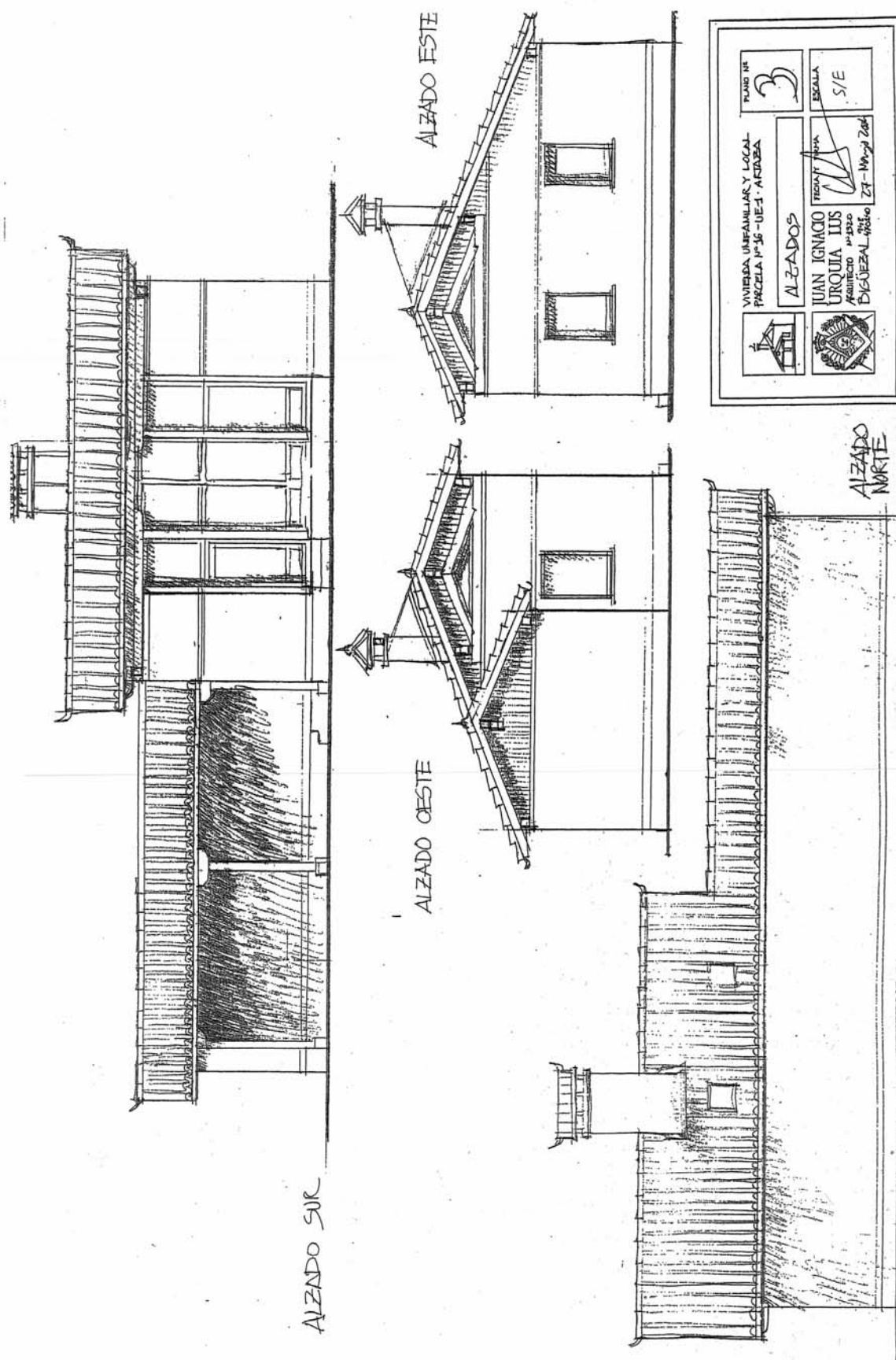




APÉNDICE 7 – PLANOS DEL PROYECTO DE UNA VIVIENDA DE BALAS DE PAJA EN NAVARRA



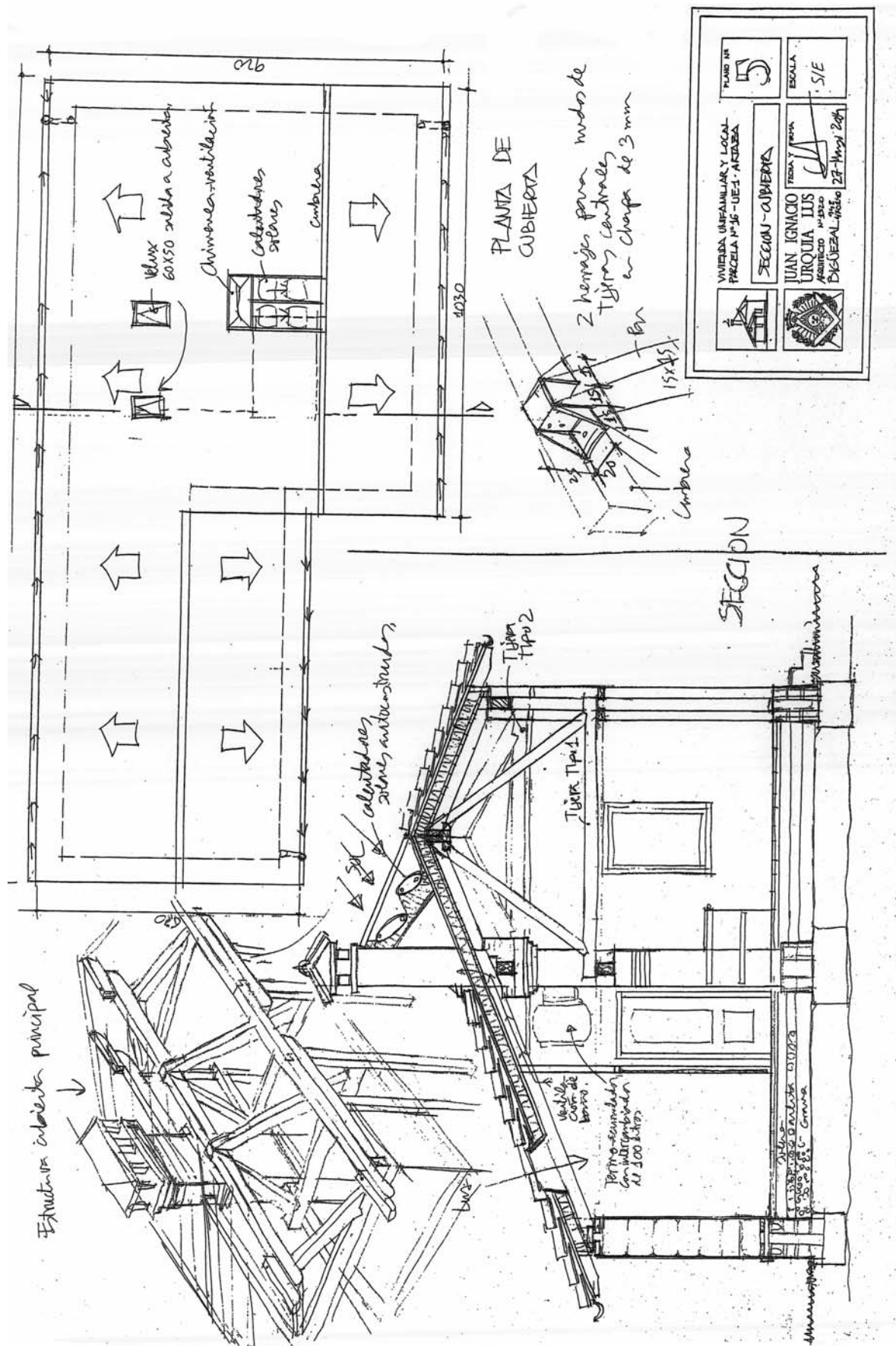
APÉNDICE 7 – PLANOS DEL PROYECTO DE UNA VIVIENDA DE BALAS DE PAJA EN NAVARRA



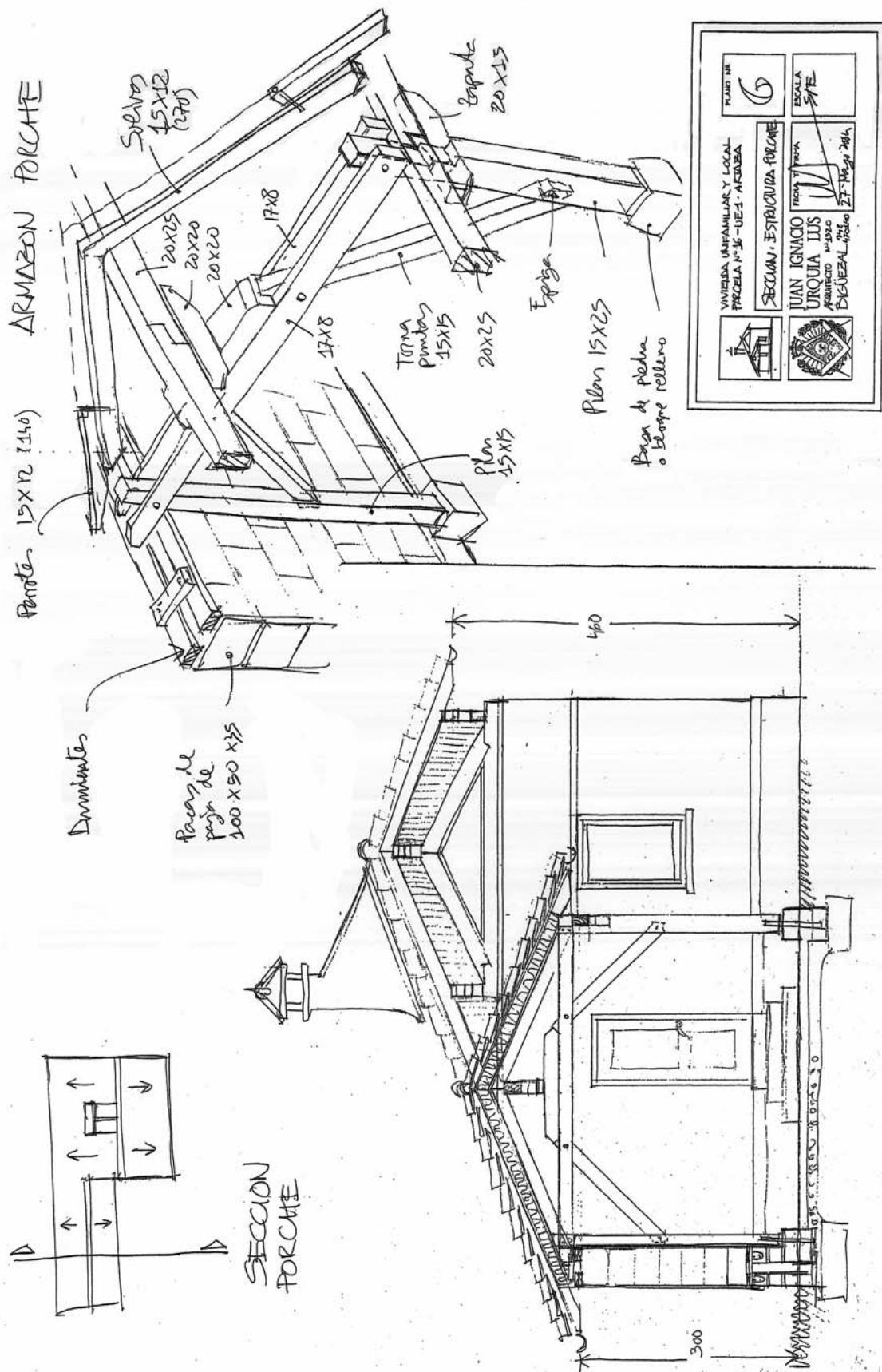
FRANCISCO JAVIER CARRO CASTRO



APÉNDICE 7 – PLANOS DEL PROYECTO DE UNA VIVIENDA DE BALAS DE PAJA EN NAVARRA



APÉNDICE 7 – PLANOS DEL PROYECTO DE UNA VIVIENDA DE BALAS DE PAJA EN NAVARRA



FRANCISCO JAVIER CARRO CASTRO



Apéndice 8

CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS



APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

1-A

Gruppe angepasste Technologie
Technische Universität Wien
zHd. Herrn D.I. Wimmer
Wiedner Hauptstrasse 8 - 10
1040 Wien



MAGISTRAT DER STADT WIEN
MA 39 – VFA
MAGISTRATSABTEILUNG 39
VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT DER STADT WIEN
gegründet 1876
AKKREDITIERTE PRÜF- UND ÜBERWACHUNGSTELLE
A-1110 Wien, Rumpfschtrasse 15
Telefon: (national) 01; international +431 79554-8039 oder 046
Telefax: (national) 01; international +431 79554-86-8639 oder 046
Internet-e-mail: post@ma39mag.wien.gv.at

MA 39 - VFA 2000-0563 02

Wien, 6. November 2000



U n t e r s u c h u n g s b e r i c h t

über die Messung der Wärmeleitfähigkeit von

Strohballen

Antragsteller: Gruppe angepasste Technologie
Technische Universität Wien

Antragsdatum: 6. April 2000

Prüfgut: Das Prüfgut (2 Holzrahmen, - oben und unten mit Eisengitter abgeschlossen und mit Stroh verfüllt) wurde am 6. April 2000 an die MA 39 - VFA geliefert. (um Messverfälschungen zu vermeiden wurden vor der Messung die Eisengitter entfernt).

Die Rahmen besaßen die Abmessungen
500 mm x 500 mm x 100 mm

Auf Wunsch des Antragstellers wurden die Rahmen mit Strohfüllung nach einer entsprechenden Vortrocknung geprüft.

Prüfprogramm: Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattenapparat gemäß ÖNORM B 6015-1 (letztgültige Ausgabe)

Kurzbeurteilung: Die Strohballen weisen eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,K} = 0,0380 \text{ W/mK}$ auf.

Der Bericht umfasst 2 Seiten.



Die Prüfergebnisse (Qualität) nach Abschluß der Prüfung sind in der beigefügten Tabelle festgehalten. Bei Bedarf kann eine Nachprüfung der Ergebnisse angefordert werden. Die Nachprüfung ist kostenlos. Bei Bedarf kann eine Nachprüfung der Ergebnisse angefordert werden. Die Nachprüfung ist kostenlos.

Einschreibe:
MA 39

Telefonnummer:
MAGISTRAT WIEN

Einschreibe:
Montag bis Freitag 7.30 - 15.30 Uhr

046
00311

Bankverbindung:
Bank Austria AG, Wien, Konto 880 254 792

MA 39 - VFA - 2000-0563 02



APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

1-B

MA 39 - VFA 2000-0563.02

Prüfverfahren:

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bzw. des Wärmedurchlasswiderstandes erfolgte mit einem Plattengerät nach ÖNORM B 6015, Teil 1 (letztgültige Ausgabe).

Prüfgerät:

Für die Prüfung wurde ein Zweiplattengerät mit der Heizplattengröße 300 mm x 300 mm verwendet.

Herstellung:

In der MA 39 - VFA wurden aus dem angelieferten Material 2 Prüfkörper der Größe 500 mm x 500 mm x 100 mm angefertigt. Die Proben wurden normgemäß bis zur Massekonstanz getrocknet.

Proben:

Probendicke	100,6	mm
Rohdichte (im getrockneten Zustand)	100,8	kg/m ³
Trocknungstemperatur	70	°C

Prüfdatum:

Die Prüfung erfolgte vom 29. Juli 2000 bis 1. August 2000

Messwerte:

Nach dem Erreichen des stationären Zustandes ergaben sich folgende Mittelwerte bzw. Rechenwerte:

Mitteltemperatur der Proben	10,0 °C	19,5 °C	28,7 °C
Temperaturdifferenz zwischen den warm- und kaltseitigen Probenoberflächen	10,6 K	11,0 K	11,1 K

Wärmeleitfähigkeit

Messwert λ_p	0,0380 W/mK	0,0394 W/mK	0,0408 W/mK
----------------------	-------------	-------------	-------------

Vereinbarungsgemäß werden lediglich die o.a. Messergebnisse ausgewiesen und nicht mit einem baustoffspezifischen Zuschlag beaufschlagt. Die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit ist eine Teilprüfung und ermöglicht daher keine Aussage über weitere Materialeigenschaften des vorliegenden Produktes.

Der Laboratoriumsleiter:



Dipl.-Ing. C. Pöhn
Oberstadtbaurat



Der Leiter der Versuchs- und Forschungsanstalt:



Dipl.-Ing. W. Fleck
Senatsrat



APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

Gruppe Angepaßte Technologie
Technische Universität

Wiedner Hauptstraße 8-10
1040 Wien

MA 39 - VFA 2000-0644.01-.02



2-A

MAGISTRAT DER STADT WIEN
MA 39 – VFA
MAGISTRATSABTEILUNG 39
VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT DER STADT WIEN
gegründet 1879
AKKREDITIERTE PRÜF- UND ÜBERWACHUNGSSTELLE
A-1110 Wien, Rinnböckstraße 15
Telefon: (national 01), (international +43) 79514-9039 oder DW
Telefax: (national 01), (international +43) 79514-99-8039 oder DW
Internet e-mail: post@m39.magwien.gv.at

Wien, 4. Mai 2000

Prüfbericht

über die

Brennbarkeit von Strohballen

Antragsteller: Gruppe Angepaßte Technologie, Technische Universität

Antragsdatum: 07. Februar 2000

Prüfgut: Strohballen: MA 39 - VFA - 2000-0644.01: Rohdichte 90 kg/m³
MA 39 - VFA - 2000-0644.02: Rohdichte 120 kg/m³

Prüfprogramm: Prüfung der Brennbarkeitsklasse gemäß ÖNORM B 3800, Teil 1, Ausgabe 1988

Kurzbeurteilung: Aufgrund der Versuchsergebnisse haben die geprüften Strohballen mit einer durchschnittlichen Rohdichte von 90 kg/m³ (MA 39 - VFA - 2000-0644.01) und 120 kg/m³ (MA 39 - VFA - 2000-0644.02) die Kriterien für die Brennbarkeitsklasse B2 (normalbrennbar) gemäß ÖNORM B 3800, Teil 1, Ausgabe 1988, erfüllt.

Der Bericht umfaßt 3 Seiten
und 1 Beilage (2 Seiten).



Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände. Alle Seiten des Berichtes sind mit dem Amtssiegel der Stadt Wien versehen. Veröffentlichung und Auszüge bedürfen der schriftlichen Bewilligung der Anstalt. Laborberichte, Gutachten und Stellungnahmen werden im nicht akkreditierten Bereich durchgeführt. Es gelten die derzeit gültigen Allgemeinen Geschäftsbedingungen der MA 39 - VFA.

Fernschreiber
114735

Telegrammschrift:
MAGISTRAT WIEN

Parteienverkehr:
Montag bis Freitag: 7.30 – 15.30 Uhr

DVR:
0000191

Bankverbindung:
Bank Austria AG, Wien, Konto 686 254 754

MA 39 – SD 54 – 117999 – 54

Akkreditiert als Prüf- und Überwachungsstelle (1) gemäß AArd, 90/26, Nr. 485/1992, i.d.F. des Bundesgesetzes BGBl. Nr. 436/1996 per Bescheid des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten, GZ 92714/1-002007 und (2) gemäß VFAAG, LGBl. Nr. 30/98 (per Akkreditierungsbescheid des Österreichischen Instituts für Bautechnik, Zahl OIB 195-90/99-015). Mit dem Akkreditierungsbescheid wird bestätigt, dass die MA 39 - VFA den Anforderungen der EN 45001 und EN 45004 entspricht.





APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

MA 39 - VFA 2000-0644.01-02



2-B

1 Prüfgutbeschreibung

Vom Antragsteller wurden jeweils 10 Versuchsproben, je 5 für die Kantenbeflammung und 5 für die Flächenbeflammung, bereits in Prüfkörbchen gefüllt (Abmessungen, siehe Pkt. 3 Versuchsdurchführung) angeliefert.

Stoffaufbau:	Getreidestroh (Weizen)
(lt. Angaben des Herstellers)	
Verwendungszweck:	Dämmstoff
Farbe:	gelb-braun
Rohdichte:	ca. 90 kg/m ³ (MA 39 - VFA - 2000.0644.01), entnommen aus Kleinballen (36 cm x 46 cm x 75 cm)
	ca. 120 kg/m ³ (MA 39 - VFA - 2000.0644.02) entnommen aus Großballen (120 cm x 70 cm x 250 cm)

2 Prüfung zur Beurteilung der Normalbrennbarkeit (Brennbarkeitsklasse B2)

Die Prüfung erfolgte nach dem Kleinbrennerversuch gemäß ÖNORM B 3800, Teil 1, Ausgabe 1988.

3 Versuchsdurchführung

Die Probe wurde vor dem Versuch bei 23°C ± 2°C und 50 % ± 5 % Luftfeuchtigkeit bis zur annähernden Massekonstanz gelagert.

Es wurden 5 Versuche durchgeführt.

Für diese Prüfung wurden je zwei Proben in einen dafür vorgesehenen Prüfkörper aus Drahtgitter mit den Abmessungen 90 x 190 x 45 mm (Breite x Länge x Dicke) für die Kantenbeflammung und der Größe 90 x 230 x 45 mm (Breite x Länge x Dicke) für die Flächenbeflammung mit dem Prüfgut befüllt. An jedem Probekörper wurde in seiner vollen Breite im Abstand von 40 mm von seiner Oberkante eine Meßmarke angebracht.

Gegen die Unterkante der senkrecht aufgehängten Probe bei der Kantenbeflammung und in 40 mm Abstand von der Unterkante bei der Flächenbeflammung wird die Flamme eines Gasbrenners gerichtet. Der Probekörper wird 15 Sekunden lang beflammt und anschließend der Brenner zurückgezogen. Die Zeitdauer vom Beginn der Beflammung bis zum Zeitpunkt, zu dem die Flammenspitze des brennenden Probekörpers die Meßmarke erreicht, wird gemessen, sofern die Flamme nicht vorher von selbst erlischt.

Die Beobachtungen während der Versuche und die Prüfergebnisse sind auf Seite 1 der Beilage enthalten.





APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

MA 39 - VFA 2000-0664.01-.02

2-C

3 Beurteilung

Baustoffe gelten als normalbrennbar (Brennbarkeitsklasse B2), wenn bei allen 5 Probekörpern die Flammenspitze die Meßmarke innerhalb von 20 Sekunden nach Beginn der Beflammung nicht erreicht.

Aufgrund der Versuchsergebnisse haben die geprüften Strohballen mit einer durchschnittlichen Rohdichte von 90 kg/m^3 (MA 39 - VFA - 2000 - 0644.01) bzw. die geprüften Strohballen mit einer durchschnittlichen Rohdichte von 120 kg/m^3 (MA 39 - VFA - 2000 - 0644.02) die Kriterien für die Brennbarkeitsklasse B2 (normalbrennbar) gemäß ÖNORM B 3800, Teil 1, Ausgabe 1988, erfüllt.

Die Gültigkeit des Prüfberichtes beträgt gemäß ÖNORM B 3800, Teil 2, Ausgabe 1997, vier Jahre ab Ausstelldatum und kann auf Antrag um jeweils zwei Jahre verlängert werden.

Der Sachbearbeiter:

Ing. K. Danzinger



Der Laboratoriumsleiter:

Dipl. Ing. C. Pöhn

Der Leiter der Versuchs- und
Forschungsanstalt:

Dipl. Ing. W. Fleck
Senatsrat





APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

3-A

Gruppe Angepaßte Technologie
Technische Universität Wien

Wiedner Hauptstrasse 8-10
1040 Wien

MA 39 - VFA 2000-0644.04

MAGISTRAT DER STADT WIEN
MA 39 – VFA
MAGISTRATSABTEILUNG 39
VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT DER STADT WIEN
gegründet 1879
AKKREDITIERTE PRÜF- UND ÜBERWACHUNGSSTELLE
K-1110 Wien, Floridsdorfstrasse 15
Telefon: (national 01), (international +43) 79014-8030 oder 010
Telex: (national 01), (international +43) 79014-99-8030 oder 010
Internet e-mail: post@ma39-mag.wien.gv.at
Wien, 6. Oktober 2000

MAGISTRATSABTEILUNG 39
WIEN

Prüfbericht

über

das Brandverhalten einer Strohballenwand
(mit Innen- und Außenputz)

Antragsteller: Gruppe Angepaßte Technologie
Technische Universität Wien

Antragsdatum: 7. Februar 2000

Prüfgut: Strohballenwand in einer Holzständerkonstruktion eingebaut,
beidseitig verputzt; Gesamtdicke 43 cm

Prüfprogramm: Prüfung der Strohballenwand als nichttragender, raumbegrenzender
Bauteil hinsichtlich der Brandwiderstandsklasse F90 gemäß
ÖNORM B 3800-2, Ausgabe 1997.

Kurzbeurteilung: Auf Grund der Versuchsergebnisse hat die geprüfte Strohballen-
wand, eingebaut in einer Holzständerkonstruktion, einem Lehm-
Innenputz (2 cm), und einem Kalk-Außenputz (2 cm), mit einer
Gesamtdicke von 43 cm, die Anforderungen an die Brand-
widerstandsklasse F90 (brandbeständig) gemäß ÖNORM B 3800-2,
Ausgabe 1997, erfüllt.

neu

Der Bericht umfasst 4 Seiten
und 1 Beilage (8 Seiten).



Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände. Die Seiten
des Berichts sind mit dem Amtssiegel der Stadt Wien versehen. Veröffentlichung und
Ausgabe Kopien der schriftlichen Beurteilung des Brand- und Widerstandsklasse
und Leistungsmerkmale werden in nicht akkreditierten-Bericht durchgeführt. Es gelten
die derzeit gültigen allgemeinen Geschäftsbedingungen der MA 39 – VFA.

Abdruckrecht des Prüfer und Überwachungsstelle (gemäß Art. 10, Abs. 1, lit. f des Bundes-
gesetzes 1994, Nr. 43/1994 zum Bundesgesetz des Bundesministeriums für wirtschaftlichen Ange-
legenheiten (GZ 43/1994) und/oder gemäß Art. 10, Abs. 1, lit. f des Bundesgesetzes des
Österreichischen Instituts für Statistik, zum GZ 43/1994 zum Bundesgesetz des Bundesministeriums für
Wirtschaft, dass die MA 39 – VFA den Anforderungen der EN 45001 und EN 45004 entspricht)

Fernschreiben:
EN 45001
MA 39 – SE 14 – 19999 – 14

Telegraphische:
MAGISTRAT WIEN

Funkentelefon:
Montag bis Freitag 7.30 – 15.30 Uhr

DVFR:
0000181

Rechnungsabteilung:
Bank Austria AG, Wien, Konto 690 254 754





APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

5

6

MA.39 - VFA.2000-0544.04



3-B

1 Versuchsbedingungen

Die Versuchsbedingungen waren durch die ÖNORM B 3800-2, Ausgabe 1997, gegeben, wonach nichttragende, raumbegrenzende Bauteile einseitig den Temperaturen der Einheitstemperaturkurve ausgesetzt sind. Während des Versuches ist der Temperaturverlauf an der feuerabgekehrten Oberfläche des Prüfkörpers zu messen und sein Verhalten zu beobachten.

2 Prüfkörper

Von Fachkräften des Antragstellers wurde am 18. Juli 2000 ein Wandelement mit den Abmessungen 2280 mm x 2500 mm (B x H) mittig in ein 25 cm starkes Porenbetonmauerwerk eingebaut. Die Porenbetonmauer war in einem Stahlprüfrahmen U 260, 4030 mm x 3490 mm (B x H) errichtet worden.

Der Aufbau des Prüfkörpers ist der Beilage, Seite 1 zu entnehmen.

3 Versuchsaufbau

Der Prüfrahmen wurde vor die Brandkammer mit der lichten Prüföffnung 2870 mm x 3050 mm (B x H) gestellt und zu dieser mit Steinwollestreifen abgedichtet. Zur Messung der Temperaturen im Brandraum waren in diesem in ca. 10 cm Abstand zum Prüfkörper 5 Thermoelemente angebracht (siehe Beilage, Seite 2). An der feuerabgekehrten Oberfläche des Prüfkörpers waren 7 Thermoelemente angeordnet (siehe Beilage, Seite 3).

Beflammt wurde die mit Lehmputz versehene Seite des Prüfkörpers.

4 Versuchsdurchführung

Vor dem Brandversuch wurde die Kugelschlagprüfung mit einer 15 kg schweren Stahlkugel mit einer Schlagarbeit von 20 Nm gemäß ÖNORM B 3800, Teil 2, Ausgabe 1997, Pkt. 5.2.9., durchgeführt. Dabei traten keine Schäden auf.

Die Brandkammer wurde mittels zweier Ölbrenner (Heizöl extra leicht gemäß ÖNORM C 1109) beheizt. Die Regelung der Temperatur im Brandraum erfolgte nach dem Mittelwert der Brandraumtemperaturmessstellen entsprechend der Einheitstemperaturkurve.

Die Prüfung erfolgte am 25. Juli 2000.

Die Temperatur in der Versuchshalle betrug vor Versuchsbeginn 24°C. Während des Versuchs wurde im Brandraum ein Überdruck von 10 ± 2 Pa aufrechterhalten.





APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

4

2 MA 39 - VFA 2000-0644.04



3-C

Beobachtungen während des Versuches:

Nach 5 Minuten trat eine Verfärbung des Lehmputzes auf (Brandraum).
Nach 10 Minuten und 30 Sekunden begann der Lehmputz abzufallen (Brandraum).
Nach 16 Minuten trafen Risse über die gesamte Fläche auf (Brandraum).
Nach 24 Minuten und 10 Sekunden fielen große Teile des Lehmputzes ab (Brandraum).
Nach 25 Minuten wurde starker Mitbrand des Prüfkörpers (Brandraum) festgestellt.
Nach 33 Minuten wurde Risse an der feuerabgekehrten Seite festgestellt.
Nach 42 Minuten begann die Bretterschalung (Brandraum) abzufallen.
Nach 68 Minuten wurde geringer Rauchaustritt an der feuerabgekehrten Seite festgestellt.
Nach 90 Minuten wurde die Kugelschlagprüfung mit einer 15 kg schweren Stahlkugel mit einer Schlagarbeit von 20 Nm gemäß ÖNORM B 3800, Teil 2, Ausgabe 1997, Pkt. 5.2.9, durchgeführt, wobei der Raumabschluss gewährleistet blieb.
Nach dem Brandversuch fanden die Löscharbeiten unter überdurchschnittlich starker Rauchentwicklung statt.

In der Beilage, Seite 4 bis Seite 6, sind die während des Versuches gemessenen Temperaturen (Brandraumtemperaturen, Temperaturen auf der feuerabgekehrten Seite) und die Verformungsmesswerte zusammengefasst.

Fotodokumentation, siehe Beilage Seite 7 bis Seite 8.

5 Beurteilung

Gemäß ÖNORM B 3800, Teil 2, Ausgabe 1997, müssen Probekörper raumbegrenzender Bauteile während der Versuchsdauer das Durchdringen von Feuer, Rauch und gasförmigen Zersetzungsprodukten verhindern. Ebenso dürfen allfällige Zersetzungsprodukte aus dem Probekörper selbst nur in geringer Menge an der dem Feuer abgekehrten Seite auftreten; an dieser Seite des Probekörpers dürfen keine entzündlichen Gase auftreten, die nach Wegnahme einer fremden Zündquelle weiterbrennen.

Die Probekörper dürfen sich an dieser Seite im Mittel um nicht mehr als 140 K über ihre Temperatur bei Versuchsbeginn erwärmen. An keiner Messstelle darf sich hierbei die Temperatur um mehr als 180 K über die Anfangstemperatur erhöhen. Die Probekörper von Wänden müssen am Ende des Brandversuches vollflächig in einer Gesamtdicke ihrer Schichten von mindestens 1 cm erhalten geblieben sein und den Beanspruchungen des Schlagversuchs so widerstehen, dass ihre raumbegrenzende Wirkung gewahrt ist.

Als Bauteilabschluss gegen andere Bauteile ist, wie im gegenständlichen Versuch, eine F90 - Ausführung zu wählen.





APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

6

3-D

7 MA 39 - VFA 2000-0644.04

Auf Grund der Versuchsergebnisse hat die geprüfte Strohballenwand, eingebaut in einer Holzständerkonstruktion, einem Lehm-Innenputz (2 cm), und einem Kalk-Außenputz (2 cm), mit einer Gesamtdicke von 43 cm, die Anforderungen an die Brandwiderstandsklasse F90 (brandbeständig) gemäß ÖNORM B 3800-2, Ausgabe 1997, erfüllt.

Die Gültigkeit des Prüfberichts beträgt gemäß ÖNORM B 3800-2: zunächst vier Jahre ab Ausstellungsdatum und kann auf Antrag um jeweils zwei Jahre verlängert werden.

Der Sachbearbeiter:

Ing. K. Danzinger

Der Laboratoriumsleiter:

Dipl. Ing. C. Pöhn
Oberstadtbaurat

Der Leiter der Versuchs- und
Forschungsanstalt:

Dipl. Ing. W. Fleck
Senatsrat





APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

4-A

DI Hannes Hohensinner
GrAT TU Wien
Wiedner Hauptstraße 8 – 10
1040 Wien

MA 39 - VFA 2003-0524.01-04



MAGISTRAT DER STADT WIEN
MA 39 – VFA
MAGISTRATSABTEILUNG 39
VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT DER STADT WIEN
gegründet 1879
AKKREDITIERTE PRÜF- UND ÜBERWACHUNGSSTELLE
A-1110 Wien, Rinnböckstraße 15
Telefon: (national 01) (international +43 1) 795 14-6039 oder DW
Telefax: (national 01) (international +43 1) 795 14-99-8039 oder DW
Internet E-Mail: post@m39.magi.wien.gv.at

Wien, 16. April 2003



Prüfbericht

Über

Messungen der Luftschalldämmung einer Strohballenwand mit Fassadenverkleidung bzw. Lehmputz (4 Prüfvarianten)

- Antragsteller:** Herr DI Hannes Hohensinner, GrAT TU Wien
1040 Wien
- Antragsdatum:** Februar 2003, telefonisch durch Herrn DI Hannes Hohensinner
- Prüfgut:** 9 cm Kreuzlagen-Platte (dreischichtig, Fichtenholz)
50 cm Strohballenebene

5 cm Lattung (Holzstaffel 5x5 cm, e = 62,5 cm)
2,2 cm Fassadenverkleidung (Dreischichtplatte, Fichte)

bzw.

3 – 4 cm Lehmputz mit Jutenetz
- Prüfart:** Schallprüfräume der Versuchs- und Forschungsanstalt
der Stadt Wien - MA 39-VFA
- Auftrag:** Messung der Luftschalldämmung gemäß ÖNORM EN 20140-3,
Ausgabe 1995 und Beurteilung der Ergebnisse gemäß ÖNORM B 8115-2,
Ausgabe 2002.

Der Bericht umfasst 5 Seiten
und 1 Beilage (9 Seiten).



69

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände. Alle Seiten des Berichtes sind mit dem Amtssiegel der Stadt Wien versehen. Veröffentlichung und Auszüge bedürfen der schriftlichen Genehmigung der Anstalt. Laborberichte, Gutachten und Stellungnahmen werden im nicht akkreditierten Bereich durchgeführt. Es gelten die derzeit gültigen Allgemeinen Geschäftsbedingungen der MA 39 – VFA.

Famachweise
1147360

Telegrammnummer
MAGISTRAT WIEN

MA 39 – SD 54 – 062001 – 54

Parteienvermerk
Montag bis Freitag: 7.30 – 17.30 Uhr

DVR
0000101

Bankverbindung:
Bank Austria AG, Wien, Kontonr. 858 013 024

Akkreditiert als Prüf- und Überwachungsstelle (P) gemäß AkkZ, BGBl. Nr. 408/1992; i.d.F. des Bundesgesetzes BGBl. Nr. 400/1996 per Beschluss des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten, GZ. 907/4746/2007 und GZ. 903/4630/2007, BGBl. Nr. 20/2008 per Akkreditierungsbescheid des Österreichischen Instituts für Normung, Zähl. OIB-99/001/99-010. Mit den Akkreditierungen wird bestätigt, dass die MA 39 – VFA den Anforderungen der EN 45001 und EN 45004 entspricht.



MA 39 - VFA 2003-0524.01-04	Versuchs- und Forschungsanstalt der Stadt Wien Magistratsabteilung 39 Akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle	Seite 2 / 5
--------------------------------	--	----------------

4-B



1 Antragstellung

Auf Grund des Antrages vom Februar 2003 (telefonisch durch Herrn DI Hannes Hohensinner) sollte eine Grundkonstruktion bestehend aus einer 9 cm dicken dreischichtigen Kreuzlagenplatte aus Fichtenholz, ohne und mit einer 50 cm dicken Strohballebene und anschließend mit einer Fassadenverkleidung, bestehend aus einer 2,2 cm dicken Dreischichtplatte aus Fichtenholz auf einer Lattung aus 5 x 5 cm Holzstaffeln, bzw. einem 3 – 4 cm dicken Lehmputz mit Jutenetz, entsprechend den Abmessungen der in der Prüfanstalt vorhandenen Prüföffnung (Prüffläche 10,64 m²) errichtet und auf ihre Luftschalldämmung untersucht werden. Es wurden für sämtliche vier Varianten jeweils das bewertete Schalldämm-Maß R_w und die Spektrum-Anpassungswerte C und C_v bestimmt.

2 Wandaufbauten

2.1 Variante 1:

2.1.1 Grundkonstruktion: 9 cm dreischichtige Kreuzlagenplatte aus Fichtenholz
flächenbezogene Masse $m' = 46 \text{ kg/m}^2$

2.2 Variante 2:

2.2.1 Grundkonstruktion: 9 cm dreischichtige Kreuzlagenplatte aus Fichtenholz
flächenbezogene Masse $m' = 46 \text{ kg/m}^2$

2.2.2 Dämmschicht: 50 cm Strohballe
flächenbezogene Masse $m' = 61 \text{ kg/m}^2$

2.2.3 flächenbezogene Masse des Wandaufbaues: $m' = 107 \text{ kg/m}^2$

2.3 Variante 3:

2.3.1 Grundkonstruktion: 9 cm dreischichtige Kreuzlagenplatte aus Fichtenholz
flächenbezogene Masse $m' = 46 \text{ kg/m}^2$

2.3.2 Dämmschicht: 50 cm Strohballe
flächenbezogene Masse $m' = 61 \text{ kg/m}^2$

2.3.3 Fassadenverkleidung: 5 cm vertikale Lattung (Holzstaffeln 5 x 5 cm, $e = 62,5 \text{ cm}$),
befestigt mit Schnellbauschrauben 3 x 90 mm auf Strohschraubdübeln (35 cm lang, bestehend aus schnellhärtendem 2-Komponenten-Gießharz Biresin G27), ca. 6 Stück/m²

2,2 cm Dreischichtplatte aus Fichtenholz
flächenbezogene Masse $m' = 11 \text{ kg/m}^2$

2.3.4 flächenbezogene Masse der gesamten Wand: $m' = 121 \text{ kg/m}^2$



APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

MA 39 - VFA 2003-0524.01-04	Versuchs- und Forschungsanstalt der Stadt Wien Magistratsabteilung 39 Akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle	Seite 3 / 5
--------------------------------	--	----------------

4-C



2.4 Variante 4:

2.4.1 Grundkonstruktion: 9 cm dreischichtige Kreuzlagenplatte aus Fichtenholz
flächenbezogene Masse $m' = 46 \text{ kg/m}^2$

2.4.2 Dämmschicht: 50 cm Strohballen
flächenbezogene Masse $m' = 61 \text{ kg/m}^2$

2.4.3 Putz: 3-4 cm Lehmputz mit Jutenetz
flächenbezogene Masse $m' = 54 \text{ kg/m}^2$ (im Mittel)

2.4.4 flächenbezogene Masse der gesamten Wand: $m' = 161 \text{ kg/m}^2$

2.5: Anschluss zum Prüfstandmauerwerk:

mit Mineralwolle und Dichtungsmasse (Silikon)

3 Messdurchführung

Die Messungen (Messzeitraum 3. bis 26. März 2003) wurden mit einem geeichten Schallmesssystem der Firma Norsonic (Type RTA 840 Serien Nr. 18666), das mittels eines geeichten akustischen Kalibrators der Firma Norsonic (Type 1251, Serien Nr. 22781) kalibriert wurde, durchgeführt. Die Messung der Luftschalldämmung erfolgt in einer Richtung (bei Trennwänden wahlweise; bei Außenwänden von außen nach innen). Bei jeder der einzelnen Messreihen wurde auf einer Seite des Prüfkörpers (Sendeseite) ein Rauschen im Frequenzbereich von 100 bis 5000 Hz (in Terzbandbreite) erzeugt und die Schalldruckpegel sowohl sende- als auch empfangsseitig mit bewegten Mikrofonen aufgenommen und gespeichert. Danach wurde die Nachhallzeit des Empfangsraumes bestimmt.

4 Definitionen

Als Einzahlangabe zur Beurteilung der Luftschalldämmung von Bauteilen dienen das bewertete Schalldämm-Maß R_w sowie die Spektrum-Anpassungswerte C und C_v . Zu diesen Kenngrößen finden sich in der ÖNORM EN ISO 717-1:1997 nachfolgende Berechnungsvorschriften und Definitionen (sinngemäß):

4.1 Bewertetes Schalldämm-Maß R_w

Um die Ergebnisse von Messungen, durchgeführt nach ISO 140-3 in Terzbändern, gegeben auf 0,1 dB, zu bewerten, wird die Bezugskurve in Schritten von 1 dB gegen die Messkurve verschoben bis die Summe der ungünstigen Abweichungen so groß wie möglich wird, jedoch nicht mehr als 32,0 dB beträgt. Eine ungünstige Abweichung bei einer bestimmten Frequenz ist gegeben, wenn das Messergebnis niedriger ist als der Bezugswert. Nur ungünstige Abweichungen werden berücksichtigt.

Der Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz ist das bewertete Schalldämm-Maß R_w . Das bewertete Schalldämm-Maß wird in Dezibel (dB) angegeben.



MA 39 - VFA 2003-0524.01-04	Versuchs- und Forschungsanstalt der Stadt Wien Magistratsabteilung 39 Akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle	Seite 4 / 5
--------------------------------	--	----------------

4-D



4.2 Spektrum-Anpassungswerte C , C_v

Der Spektrum-Anpassungswert ist jener Wert, in Dezibel, der zum bewerteten Schalldämm-Maß zu addieren ist, um ein bestimmtes Schallspektrum zu berücksichtigen. Die mathematischen Definitionen der verschiedenen Spektren sowie die Berechnungsvorschriften für die Spektrum-Anpassungswerte sind in der ÖNORM EN ISO 717-1:1997 angegeben. Der Spektrum-Anpassungswert wird auf 0,1 dB berechnet und gemäß ISO 31-0 auf eine ganze Zahl gerundet.

Nachfolgend wird eine Zuordnung von verschiedenen Geräuschquellen zu den jeweiligen Spektrum-Anpassungswerten angegeben. Diese Zuordnung kann als Richtlinie für die Anwendung der Spektrum-Anpassungswerte für die Einstufung der Schalldämmung in Bezug auf diese Geräuschquellen herangezogen werden.

Der Spektrum-Anpassungswert C berücksichtigt primär mittel- und hochfrequente Geräuschquellen. Dazu gehören unter anderem Wohnaktivitäten (Reden, Musik, Radio, TV), Kinderspielen, Schienenverkehr mit mittlerer und hoher Geschwindigkeit, Autobahnverkehr über 80 km/h, Düsenflugzeuge in kleinem Abstand sowie Betriebe, die überwiegend mittel- und hochfrequenten Lärm abstrahlen.

Der Spektrum-Anpassungswert C_v berücksichtigt primär tief- und mittelfrequente Geräuschquellen. Dazu gehören unter anderem städtischer Straßenverkehr, Schienenverkehr mit geringer Geschwindigkeit, Propellerflugzeuge, Düsenflugzeuge in großem Abstand, Discomusik sowie Betriebe, die überwiegend tief- und mittel-frequenten Lärm abstrahlen.

5 Ergebnisse

Wandaufbau	Bew. Schalldämm-Maß $R_w(C;C_v)$
Variante 1 (Pkt. 2.1): Grundkonstruktion 9 cm dreischichtige Kreuzlagenplatte aus Fichtenholz	33(-1;-4) dB
Variante 2 (Pkt. 2.2): Grundkonstruktion inkl. Strohballenebene 9 cm dreischichtige Kreuzlagenplatte aus Fichtenholz 50 cm Strohballen	48(-2;-9) dB
Variante 3 (Pkt. 2.3): Gesamt-Wandaufbau 9 cm dreischichtige Kreuzlagenplatte aus Fichtenholz 50 cm Strohballen 5 cm vertikale Lattung 2,2 cm Dreischichtplatte aus Fichtenholz	53(-4;-12) dB
Variante 4 (Pkt. 2.4): Gesamt-Wandaufbau 9 cm dreischichtige Kreuzlagenplatte aus Fichtenholz 50 cm Strohballen 3-4 cm Lehmputz mit Jutenetz	55(-3;-10) dB

In der Beilage (Seite 1 bis 4) sind die jeweils gemessenen Kurven (dicke Messkurve) des Schalldämm-Maßes des jeweiligen Wandaufbaues in Abhängigkeit von der Frequenz sowie die Bezugskurven (dünne Messkurve) nach ÖNORM EN ISO 717-1:1997 dargestellt.



4-E

MA 39 - VFA 2003-0524.01-04	Versuchs- und Forschungsanstalt der Stadt Wien Magistratsabteilung 39 Akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle	Seite 5 / 5
--------------------------------	--	----------------

6 Technische Regelwerke

Messnorm:	ÖNORM EN 20140-3:1995
Prüfstandsnorm:	ÖNORM EN ISO 140-1:1998
Anforderungsnorm:	ÖNORM B 8115, Teil 2, Ausgabe 2002
Begriffe u. Einheiten:	ÖNORM EN ISO 717-1:1997

7 Anforderungen

In der ÖNORM B 8115, Teil 2, Ausgabe 2002, ist in Tabelle 4 und 5 der Mindestschallschutz ($R'_{\text{res,w}}$ bzw. R'_w) von Außenbauteilen angegeben. Demnach hängt der Mindestschallschutz von Außenbauteilen (einschließlich Fenster und Außentüren) vom maßgeblichen Außenlärmpegel und der Gebäudeart ab. Der Wert für das bewertete Schalldämm-Maß R_w von opaken Außenbauteilen muß mindestens 5 dB über dem Wert für das mindesterforderliche bewertete resultierende Bau-Schalldämm-Maß $R'_{\text{res,w}}$ für den gesamten Außenbauteil liegen, jedoch mindestens 43 dB betragen. Demnach ergeben sich für den opaken Teil einer Außenwand R_w -Werte von mindestens 43 dB bis (ohne Berücksichtigung extremer Schallimmissionen) mindestens 57 dB (für Krankenhäuser, Kurgelände und dgl.) Bei der Beurteilung der Schalldämmung von Außenbauteilen ist neben dem bewerteten Schalldämm-Maß R_w zusätzlich der Spektrum-Anpassungswert C_T zu berücksichtigen. Da die Summe aus $R_w + C_T$ die Differenz der A-bewerteten Schalldruckpegel des Straßenverkehrsgeräusches außen vor der Fassade und im Innenraum beschreibt, ist ein Bauteil mit gleichem R_w - Wert, jedoch höherem $R_w + C_T$ -Wert bauakustisch günstiger einzustufen. Für Außenbauteile darf die Summe von $R_w + C_T$ nicht mehr als 5 dB unter der jeweiligen Anforderung liegen.

8 Beurteilung

Auf Grund der unter Pkt. 5 für den jeweiligen Wandaufbau (Variante 3 und Variante 4) angeführten Schalldämmwerte kann festgestellt werden, dass die Anforderung an den Schallschutz für Außenwände gemäß ÖNORM B 8115-2:2002 abhängig von der Gebäudeart für einen bestimmten maßgeblichen äquivalenten Dauerschallpegel für die angeführten Wandaufbauten 3 und 4 erfüllt wird.

Da die Erfüllung der Anforderung an den Schallschutz für den gesamten Außenbauteil $R'_{\text{res,w}}$ neben dem bew. Schalldämm-Maß der Wand auch vom bew. Schalldämm-Maß der transparenten Bauteile (z.B. Fenster) und dem Flächenanteil von transparentem zu nicht transparentem Bauteil abhängt, sind diese Parameter bei der Bemessung des Schallschutzes ebenfalls zu beachten.

Der Sachbearbeiter:


Ing. K. Fleischhacker
Techn. Amtsrat

Der Laboratoriumsleiter:


Dipl. Ing. Dr. techn. C. Pöhn
Oberstadtbaurat

Der Leiter der Versuchs- und Forschungsanstalt:


Dipl. Ing. W. Fleischhacker
Senatsrat

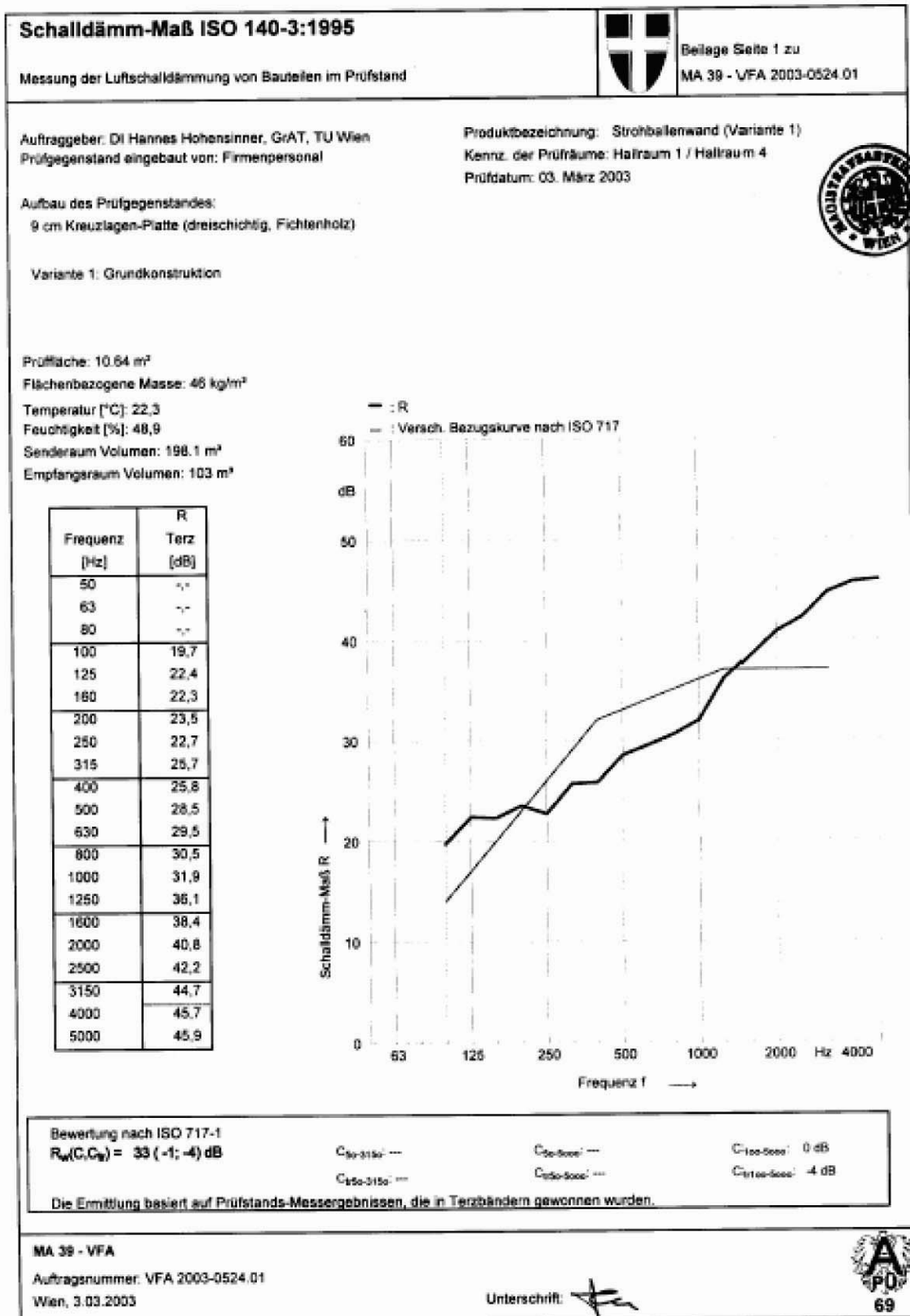






APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

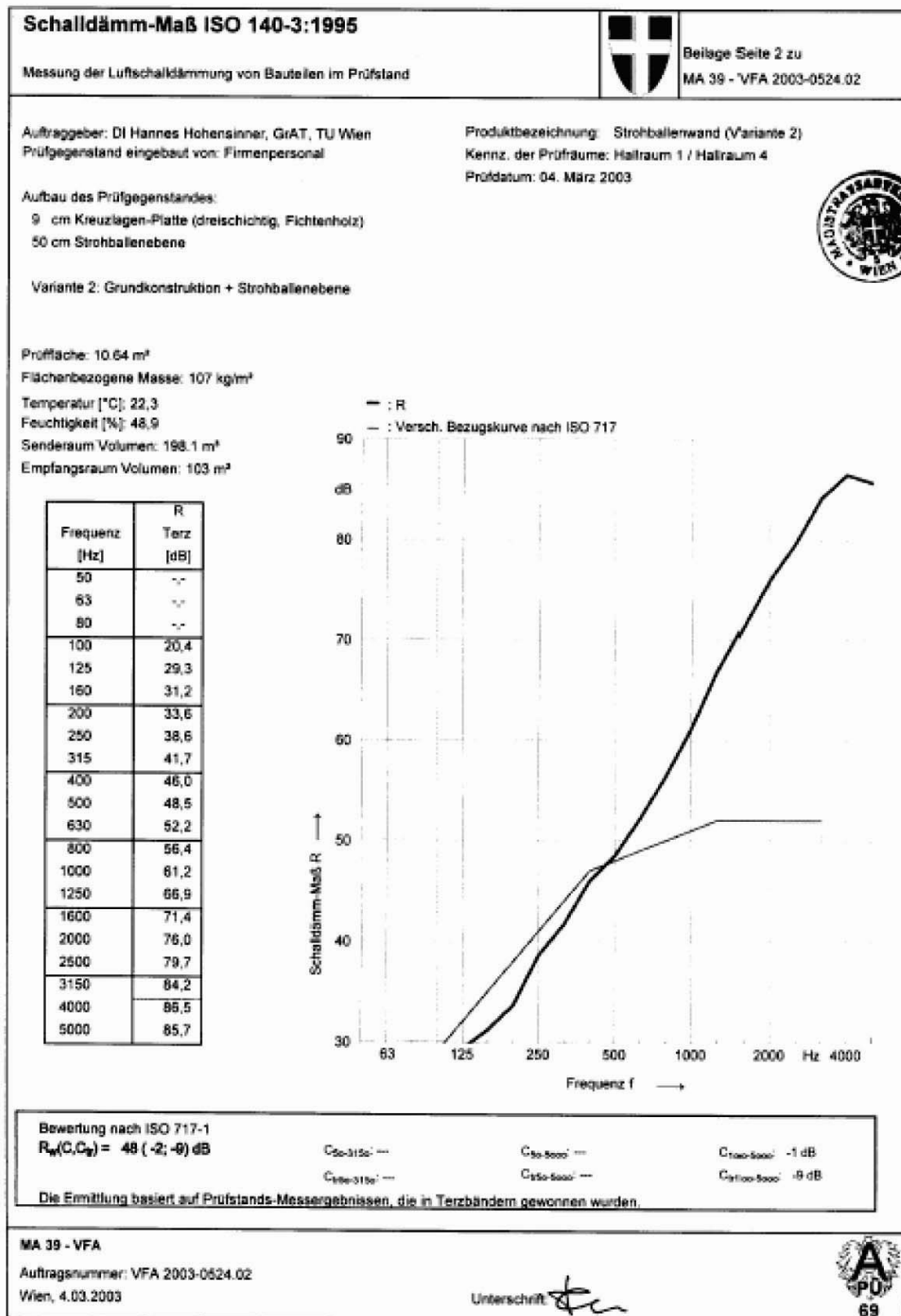
4-F





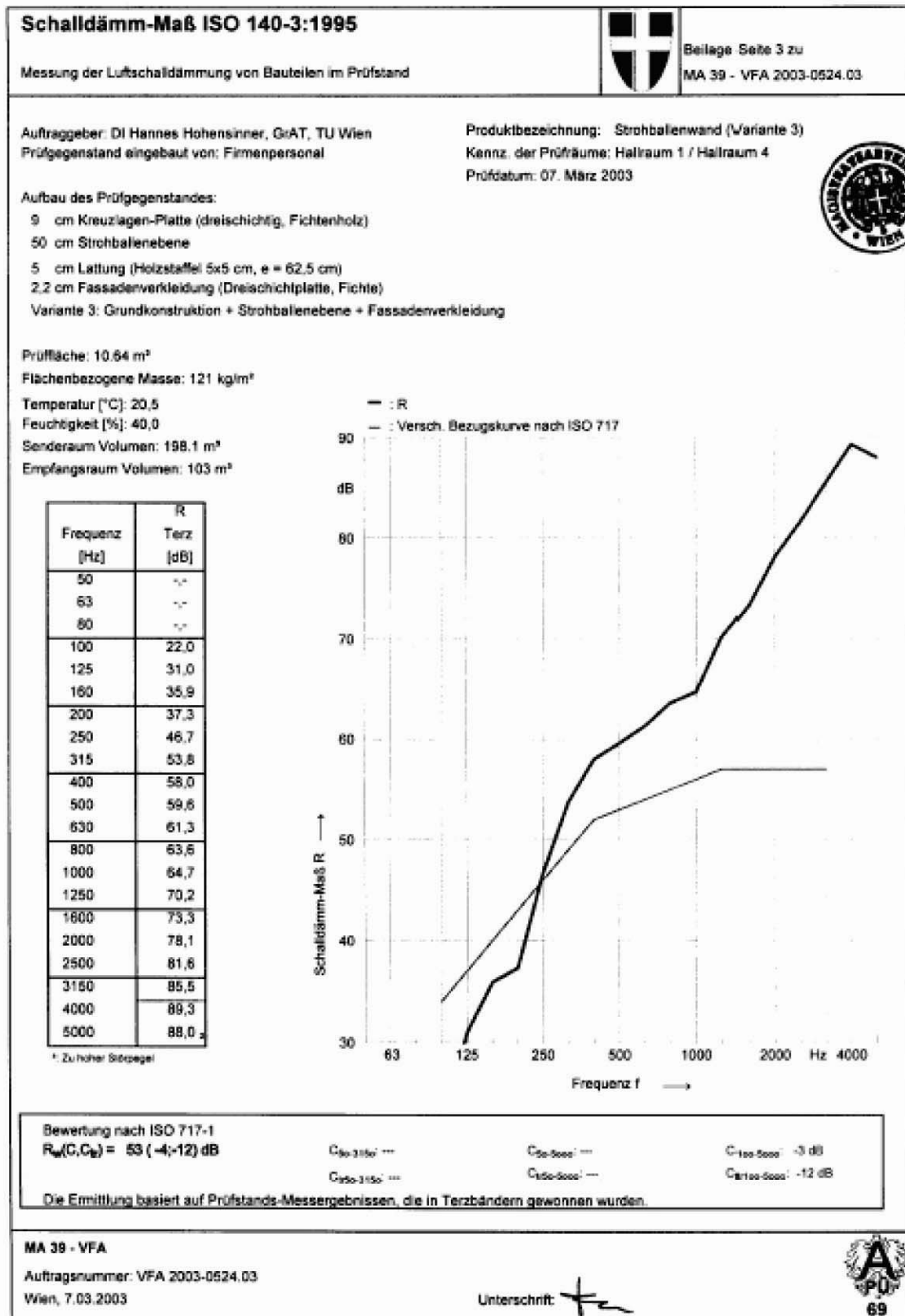
APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

4-G



APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

4-H





APÉNDICE 8 – CERTIFICADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

4-I

Schalldämm-Maß ISO 140-3:1995			Beilage Seite 4 zu MA 39 - VFA 2003-0524.04																																												
Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand																																															
Auftraggeber: DI Hannes Hohensinner, GRAT, TU Wien Prüfgegenstand eingebaut von: Firmenpersonal		Produktbezeichnung: Strohballewand (Variante 4) Kennz. der Prüfräume: Halbraum 1 / Halbraum 4 Prüfdatum: 25. März 2003																																													
Aufbau des Prüfgegenstandes: 9 cm Kreuzlagen-Platte (dreischichtig, Fichtenholz) 50 cm Strohballebene 3-4 cm Lehmputz (mit Jule-Netz)																																															
Variante 4: Grundkonstruktion + Strohballebene + Lehmputz																																															
Prüffläche: 10,64 m² Flächenbezogene Masse: 161 kg/m² Temperatur [°C]: 20,8 Feuchtigkeit [%]: 40,8 Senderaum Volumen: 198,1 m³ Empfängerum Volumen: 103 m³																																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Frequenz [Hz]</th> <th>R [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50</td><td>-</td></tr> <tr><td>63</td><td>-</td></tr> <tr><td>80</td><td>-</td></tr> <tr><td>100</td><td>26,6</td></tr> <tr><td>125</td><td>34,9</td></tr> <tr><td>160</td><td>37,2</td></tr> <tr><td>200</td><td>41,6</td></tr> <tr><td>250</td><td>43,6</td></tr> <tr><td>315</td><td>47,2</td></tr> <tr><td>400</td><td>52,4</td></tr> <tr><td>500</td><td>54,5</td></tr> <tr><td>630</td><td>59,3</td></tr> <tr><td>800</td><td>62,1</td></tr> <tr><td>1000</td><td>65,4</td></tr> <tr><td>1250</td><td>68,8</td></tr> <tr><td>1600</td><td>71,5</td></tr> <tr><td>2000</td><td>75,7</td></tr> <tr><td>2500</td><td>78,0</td></tr> <tr><td>3150</td><td>81,7</td></tr> <tr><td>4000</td><td>83,0</td></tr> <tr><td>5000</td><td>85,2</td></tr> </tbody> </table>	Frequenz [Hz]	R [dB]	50	-	63	-	80	-	100	26,6	125	34,9	160	37,2	200	41,6	250	43,6	315	47,2	400	52,4	500	54,5	630	59,3	800	62,1	1000	65,4	1250	68,8	1600	71,5	2000	75,7	2500	78,0	3150	81,7	4000	83,0	5000	85,2			
Frequenz [Hz]	R [dB]																																														
50	-																																														
63	-																																														
80	-																																														
100	26,6																																														
125	34,9																																														
160	37,2																																														
200	41,6																																														
250	43,6																																														
315	47,2																																														
400	52,4																																														
500	54,5																																														
630	59,3																																														
800	62,1																																														
1000	65,4																																														
1250	68,8																																														
1600	71,5																																														
2000	75,7																																														
2500	78,0																																														
3150	81,7																																														
4000	83,0																																														
5000	85,2																																														
* Zu höherer Störpegel																																															
Bewertung nach ISO 717-1 $R_w(C, C_{50}) = 55 (-3; -10) \text{ dB}$																																															
Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.																																															
MA 39 - VFA Auftragsnummer: VFA 2003-0524.04 Wien, 26.03.2003																																															
Unterschrift:			 69																																												

